

Territorios resilientes y eficientes en Bogotá

PERSPECTIVA
tecnológica

ROLANDO ARTURO CUBILLOS-GONZÁLEZ

FRANCISCO JAVIER NOVEGIL-GONZÁLEZ-ANLEO

OSCAR ALFONSO CORTÉS-CELY



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

ROLANDO ARTURO CUBILLOS GONZÁLEZ

Es docente investigador en la Facultad de Diseño de la Universidad Católica de Colombia. De 2010 a 2015 fue líder del grupo de investigación Sostenibilidad, Medio Ambiente y Tecnología (SOMET). Ha publicado más de 23 artículos científicos en diferentes revistas indexadas, a nivel local e internacional. De 1993 a 2009 desempeñó funciones clave en más de veinte proyectos para importantes empresas privadas y estatales de Colombia. Actualmente se encuentra en comisión de estudios, y es candidato a Ph.D. en el Doctorado de Gestión de Tecnología e Innovación de la Universidad Pontificia Bolivariana.

FRANCISCO JAVIER NOVEGIL-GONZÁLEZ-ANLEO

Es docente investigador en el programa de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia. Es Físico, Magíster en Ingeniería de Materiales, Ph.D. en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Ha publicado más de 12 artículos científicos en diferentes revistas, indexadas a nivel local e internacional. En 2002 participó en el Programa Inter-campus Beca AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional). Además, fue becado por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España, FPI.

OSCAR ALFONSO CORTÉS CELY

Arquitecto diseñador, con experiencia de 12 años en el desarrollo de propuestas de diseño arquitectónico con una visión integral del diseño, específicamente en vivienda y arquitectura funeraria, con aplicaciones de sistemas de climatización pasiva. Es Magíster en Arquitectura Bioclimática de la Escuela de Arquitectura y Diseño de América Latina y el Caribe, Isthmus, en Ciudad de Panamá, en convenio con la Universidad de Colima de México. Fue profesor de la Universidad Católica de Colombia de 2006 a 2016. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad Piloto de Colombia, en donde es docente investigador. Ha publicado más de 7 artículos científicos en diferentes revistas indexadas a nivel local.

La colección *Perspectiva Tecnológica* presenta los resultados de la línea de investigación Tecnología, ambiente y sostenibilidad, la cual se enfoca en establecer el papel del Diseño en la búsqueda de respuestas alternativas, apropiadas y adecuadas a la relación entre proyecto y contexto. En esta relación resulta fundamental prevenir, mitigar y plantear soluciones a estudios de caso específicos. Se abordan los siguientes núcleos problemáticos: la irracionalidad en el manejo del ambiente y los recursos naturales; el atraso, inadecuación tecnológica y falta de exploración de los saberes locales y por último, la reducción del diseño al simple ámbito instrumental de la proyectación. La investigación en estos temas permite proponer estrategias para el uso eficiente de los recursos naturales y los materiales, mediante el empleo de tecnologías y procesos constructivos apropiados, estimulando el desarrollo de una cultura ecológica que contribuya a mejorar la calidad de la vida, y mitigue los impactos ambientales en pro de lograr una mejor, más armónica y coordinada relación del hábitat construido con la sostenibilidad ecológica.

Territorios resilientes y eficientes en Bogotá

ROLANDO ARTURO CUBILLOS-GONZÁLEZ

FRANCISCO JAVIER NOVEGIL-GONZÁLEZ-ANLEO

OSCAR ALFONSO CORTÉS-CELY



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

Cubillos-González, Rolando Arturo

Territorios resilientes y eficientes en Bogotá / Rolando Arturo Cubillos-González, Francisco Javier Novegil-Anleo-González y Oscar Alfonso Cortés-Cely--
Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2017

118 páginas: 22,5 x 22,5 cms. —(Colección Perspectiva tecnológica)

ISBN: 978-958-8934-94-5 (impreso)

ISBN: 978-958-8934-95-2 (digital)

I. Título II. Serie. III- Novegil-Anleo-González, Francisco Javier IV. Cortés-Cely, Oscar Alfonso

1. Urbanismo- Bogotá(Colombia) 2. Arquitectura sostenible-Bogotá (Colombia) 3. Cambios climáticos-Bogotá (Colombia)

Dewey: 711.486148

Proceso de arbitraje

Primer concepto de evaluación: 19 de marzo de 2017

Segundo concepto de evaluación: marzo de 2017

© Universidad Católica de Colombia

© Rolando Arturo Cubillos-González

Francisco Javier Novegil-Anleo-González

Oscar Alfonso Cortés-Cely

Primera edición, Bogotá, D. C.

Octubre de 2017

Dirección Editorial

Stella Valbuena García

Coordinación Editorial

María Paula Godoy Casasbuenas

Corrección de estilo

José Escobar

Diseño de colección

StudioVisual.co

Camilo Jaramillo Rengifo

Nancy Cuéllar Castillo

Diagramación

Nancy Cuéllar Castillo

Publicación digital

Hipertexto Ltda.

www.hipertexto.com.co

Bogotá, D. C., Colombia

Impresión

Xpress Estudio Gráfico y Digital S.A.

Bogotá, D. C., Colombia

Facultad de Diseño

Diagonal 46A # 15B-10

Sede El Claustro

Bogotá, D. C.

cifar@ucatolica.edu.co

Editorial

Universidad Católica de Colombia

Avenida Caracas # 46-72, piso 5

Bogotá, D. C.

editorial@ucatolica.edu.co

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni total ni parcialmente o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sin el permiso previo del editor.

Hecho el depósito legal

© Derechos reservados



Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Materiales y Ensayos del Laboratorio de Ensayos Mecánicos del SENA seccional Bogotá, al Laboratorio de Propiedades Mecánicas de la Universidad Nacional y al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la misma universidad, el apoyo prestado para el ensayo de materiales y el suministro de información gráfica para esta obra.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

Facultad de Diseño

Grupo de investigación

Hábitat sustentable, diseño integrativo
y complejidad

Línea de investigación

Tecnología, ambiente y sostenibilidad

Proyecto de investigación

Propuesta para el diseño de un prototipo
de edificación resiliente y eficiente
Modelo base - Fase I





Contenido

| | |
|---------------------------------|----|
| Prefacio | 8 |
| Resumen | 10 |
| Problema de investigación | 11 |
| Introducción | 12 |

CAPÍTULO UNO

| | |
|---|-----------|
| Bogotá frente al cambio climático | 29 |
| Introducción 1 | 30 |
| El impacto del cambio climático en Bogotá | 31 |
| ¿Cómo afecta el cambio climático al hábitat urbano de Bogotá? | 34 |
| Principios de urbanismo y arquitectura sostenible en respuesta al cambio climático en Bogotá | 35 |
| La necesidad de construir territorios resilientes y eficientes en Bogotá | 37 |

CAPÍTULO DOS

| | |
|--|-----------|
| Habitabilidad, eficiencia y resiliencia | 41 |
| Introducción 2 | 42 |
| Efectos del cambio climático derivados del impacto ambiental, del sector de la construcción en Bogotá | 43 |

| | |
|--|----|
| La utilización de procesos y materiales constructivos, que afectan la habitabilidad de las edificaciones dentro del hábitat urbano de Bogotá | 45 |
| Evaluación de Impacto Ambiental | 50 |
| Resiliencia: una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá | 64 |

CAPÍTULO TRES

| | |
|--|-----------|
| Estudio de caso: el barrio Primero de Mayo de Bogotá | 71 |
| Introducción 3 | 72 |
| Descripción del barrio Primero de Mayo y método a aplicar en su estudio | 73 |
| Descripción de la metodología a utilizar en el estudio de caso | 80 |
| Resultados fase cualitativa | 84 |
| Resultados de la fase cuantitativa | 86 |
| Análisis de ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo | 91 |
| Conclusiones | 96 |
| Referencias | 98 |
| Bibliografía | 104 |



Figuras y tablas

INTRODUCCIÓN

| | |
|---|----|
| Figura 1. Precipitación extrema en la ciudad de Bogotá, 26 de enero de 2015. | 12 |
| Figura 2. Impacto en las edificaciones por precipitación extrema en la ciudad de Bogotá, 26 de enero de 2015. | 13 |
| Figura 3. Número de artículos sobre ERA, relacionados con los tópicos de estudio. | 15 |
| Figura 4. Número de artículos sobre ERA publicados por país y año de publicación. | 15 |
| Figura 5. Número de artículos sobre ERA publicados por continente. | 15 |

CAPÍTULO 1

| | |
|---|----|
| Figura 1. Causas y consecuencias del cambio climático en Bogotá. | 32 |
| Figura 2. Causas y consecuencias del cambio climático en Bogotá. | 33 |
| Figura 3. Líneas de pensamiento en respuesta al cambio climático. | 34 |
| Figura 4. Aplicación de estrategias de sostenibilidad en Bogotá a partir de un modelo base. | 39 |
| Figura 5. Cómo diseñar un modelo de territorio resiliente y eficiente. | 40 |
| Figura 6. Homologación de las respuestas del edificio según el clima y el contexto. | 41 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de materiales en el contexto local, regional y mundial. | 46 |
| Tabla 2. Clasificación de materiales en el contexto local, regional y mundial. | 47 |
| Tabla 3. Emisión y consumo en la fase de producción. | 48 |
| Tabla 4. Resiliencia de materiales. | 55 |
| Tabla 5. Resultados del ensayo Charpy. | 61 |
| Figura 1. Curva teórica de tensión deformación de un material. | 53 |
| Figura 2. Probeta normalizada bajo ASTM E8. | 55 |
| Figura 3. Probeta mecanizada de sección reducida bajo las condiciones de ASTM E8. | 56 |
| Figura 4. Ampliación de la sección reducida. | 56 |
| Figura 5. Máquina universal de ensayos del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, seccional Bogotá. | 56 |
| Figura 6. Extensómetro. | 56 |
| Figura 7. Extensómetro puesto en la unidad de verificación. | 57 |
| Figura 8. Método offset para cálculo del esfuerzo de fluencia. | 57 |
| Figura 9. Calibrador pie de rey. | 57 |
| Figura 10. Medición de la muestra. | 57 |
| Figura 11. Imagen de la interfaz de la máquina universal, dispuesta para el proceso de medición. | 58 |
| Figura 12. Extensómetro sobre la muestra dispuesta sobre el marco de carga. | 58 |
| Figura 13. Software WinUH una vez ha concluido I a zona elástica. | 58 |
| Figura 14. Proceso de deformación de la muestra metálica. | 58 |
| Figura 15. Probeta con sección de fractura, ensayo ya finalizado. | 59 |
| Figura 16. Curva esfuerzo y deformación de la zona elástica, con un <i>offset</i> del 0,2%. | 59 |
| Figura 17. Curva esfuerzo vs deformación. | 59 |
| Figura 18. Cálculos obtenidos del acero ASTM A 36. | 59 |
| Figura 19. Curva de carga vs deformación. | 60 |
| Figura 20. Péndulo de impacto Charpy. Laboratorio de ensayos mecánicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. | 60 |
| Figura 21. Dispositivo para el enfriamiento con nitrógeno líquido y calentamiento en agua de las probetas en Acero ASTM A 36. | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Gráfico de temperatura de transición. Curva de energía absorbida en función de la temperatura. | 62 |
| Figura 23. Superficie de fractura ASTM A36 a -44°C. | 62 |
| Figura 24. Superficie de fractura ASTM A36 a 90°C. | 62 |
| Figura 25. Superficie de fractura ASTM A36 a 60°C. | 63 |
| Figura 26. Modelo de habitabilidad. | 67 |
| Figura 27. Modelo de administración de ambientes resilientes. | 69 |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|----|
| Figura 1. Barrio Primero de Mayo. | 72 |
| Figura 2. Vivienda original con pequeñas modificaciones. | 73 |
| Figura 3. Vivienda original con cambio de materiales e intervención en el antejardín. | 73 |
| Figura 4. Vivienda original con modificaciones, cambio de uso y cambio de materiales. | 74 |
| Figura 5. Vivienda original con pequeñas modificaciones. | 74 |
| Figura 6. Viviendas con cambio de uso y ampliaciones en sus antejardines. | 74 |
| Figura 7. Modificación total de la vivienda original y cambio de los materiales. | 75 |
| Figura 8. Transformación de las viviendas e introducción de nuevos materiales. | 75 |
| Figura 9. Modificación de la vivienda original y cambio de los materiales. | 75 |
| Figura 10. Dos tipos de cambios en la vivienda original. | 75 |
| Figura 11. Detalle de los cambios en las viviendas originales. | 75 |
| Figura 12. Transformación y densificación de la vivienda. | 75 |
| Figura 13. Cambio del perfil urbano original. | 76 |
| Figura 14. Vivienda original con cambios mínimos en el antejardín. . | 76 |
| Figura 15. Destrucción total de la tipología original. | 76 |
| Figura 16. Perfil urbano con diferentes modificaciones. | 77 |
| Figura 17. Casa original en entorno modificado. | 77 |
| Figura 18. Utilización de nuevos materiales. | 77 |
| Figura 19. Modificación total del perfil urbano, introducción de nuevos materiales y sistemas tecnológicos. | 77 |
| Figura 20. Cambio de la fachada, ocupación del antejardín e introducción de nuevos materiales. | 77 |
| Figura 21. Viviendas originales junto a viviendas transformadas. | 78 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Vivienda original con transformación lateral. | 78 |
| Figura 23. Cambio en el perfil urbano original. | 78 |
| Figura 24. Cambio en el perfil urbano. | 79 |
| Figura 25. Vivienda original. | 79 |
| Figura 26. Vivienda original junto a viviendas transformadas. | 79 |
| Figura 27. Transformaciones en la vivienda original. | 79 |
| Figura 28. Cambio en la tipología de la vivienda. | 79 |
| Figura 29. Nuevos materiales y transformación total de las viviendas. | 79 |
| Tabla 1. Diseño factorial fase 1 adaptado al español. | 81 |
| Tabla 2. Hoja de datos No. 1 Factor calidad de la edificación vs flexibilidad y patrones sociales. | 85 |
| Tabla 3. Hoja de datos No. 2 Factor calidad de vida vs flexibilidad y patrones sociales. | 85 |
| Tabla 4. Diseño factorial simulación fase cuantitativa. | 88 |
| Tabla 5. Modelo de simulación por MS Excel fase cuantitativa. | 90 |
| Figura 30. Pasos para la realización del trabajo de campo. | 83 |
| Figura 31. Resultados efecto primario y efectos secundarios. | 84 |
| Figura 32. Resultados de las relaciones entre factores. | 84 |
| Figura 33. Resultados efecto general de la fase cuantitativa. | 88 |
| Figura 34. Resultados efecto primario de la fase cuantitativa. | 89 |
| Figura 35. Resultados efecto simple de la fase cuantitativa. | 89 |
| Figura 36. Relaciones entre las variables de estudio de la fase cuantitativa. | 89 |
| Figura 37. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 93 |
| Figura 38. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 93 |
| Figura 39. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 94 |
| Figura 40. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 94 |
| Figura 41. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 95 |
| Figura 42. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. | 95 |



Prefacio

Recibí con gran alegría la invitación a escribir el prefacio de la primera edición del libro *Territorios resilientes y eficientes en Bogotá*, fruto de una intensa investigación acerca de los conceptos de resiliencia, cambio climático y vulnerabilidad aplicados en esa ciudad. En realidad, mi primera alegría fue haber recibido la invitación a revisar tan importante trabajo que, en palabras de los propios autores, prueba la hipótesis de que “es posible proponer un modelo básico de Territorio Resiliente Eficiente (TRE) que responda de manera eficaz a los cambios climáticos, plantear la capacidad de adaptación a eventos extremos en contextos específicos”.

No fue una tarea fácil, pues después de años de investigación realizada por los autores me correspondió a mí evaluar y verificar si la hipótesis presentada por ellos era verdadera. Creo que este desafío ha sido mucho más grande para mí y me siento muy feliz de haber formado parte de un cierre con llave de oro. Desde ya deseo mucho éxito al libro y que vengan nuevas ediciones.

El tema presentado en esta obra no podría ser más actual: cambio climático y vulnerabilidad urbana, siendo la resiliencia la variable que relaciona estos dos aspectos. En este sentido, sin duda el libro atraerá a muchos lectores,

ya que, aunque el tema es relevante, son pocos los estudios existentes de forma tan amplia y completa.

El concepto de “resiliencia” vino para quedarse. En general, podemos decir que la resiliencia es la capacidad de anticiparse, reaccionar y recuperarse de crisis y perturbaciones sin entrar en ruptura o en colapso. Darwin decía que no son los más fuertes o los más inteligentes los que sobreviven, sino aquellos que tienen una mayor capacidad de adaptación. El ambiente que nos rodea está en permanente cambio y todos tienen que adaptarse. ¡Lo que no cambia, muere! Es en la adaptación donde hallamos parte de la esencia del concepto de resiliencia.

En esta perspectiva, las Naciones Unidas lanzaron, en 2010, la campaña “*Making Cities Resilient*”, con el objetivo de centrar la atención de los gobernantes, especialmente a escala local, sobre la cuestión del riesgo urbano frente a diferentes tipos de amenazas que tienden a ser cada vez más diversificadas y complejas.

La resiliencia en cuestión fue analizada en la ciudad de Bogotá a partir de factores ambientales, sociales y económicos. A pesar de que Bogotá posee sus particularidades, la realidad que enfrentan los grandes centros urbanos es igual en todo el mundo, tanto en Colombia y en Brasil, como en cualquier otro país. La diferencia está en los planes y acciones desarrollados por cada gestión urbana, para que la población no se vea afectada por eventos extremos de calor, como consecuencia del cambio climático. Pensar en una ciudad resiliente es sin duda la mejor opción para la reducción de los gases de efecto invernadero y para la construcción de una buena habitabilidad, todo lo cual llevará a mejores niveles de sustentabilidad en el espacio urbano.

El concepto de territorio resiliente se define como el espacio donde las múltiples dimensiones urbanas permiten un equilibrio entre sus diferentes actores y componentes, ya que lo contrario demanda mucho consumo de energía y recursos. Tanto las ciudades como las edificaciones deben estar preparadas para adaptarse a las nuevas condiciones climáticas que se dibujan en el futuro cercano. Y, de forma bastante asertiva, esta investigación mostró que existe una clara relación entre los conceptos, involucrando eficiencia energética, materiales constructivos y análisis de ciclo de vida.

En teoría, los territorios resilientes son territorios menos vulnerables y más preparados para lidiar con el cambio, con la complejidad, con crisis y perturbaciones múltiples (de carácter económico, ambiental, tecnológico, social o político), evitando disrupciones y colapsos, siendo por ello más sostenibles a largo plazo. Lo que está en juego es la posibilidad de pensar, preparar y adaptar nuestros territorios y poblaciones a los diferentes escenarios de perturbación.

La obra es una investigación, pues, tras varios análisis de innumerables parámetros y factores, los autores lograron crear un modelo piloto de evaluación del comportamiento de los llamados Territorios Resilientes Eficientes (TRE), capaces de adaptarse a las nuevas condiciones ambientales y que apunten a solucionar los problemas de habitabilidad en la ciudad. La metodología se basa, en gran medida, en la revisión de los artículos de revistas científicas indexadas de gran importancia internacional en el área de la arquitectura. Esto proporcionó a los autores conocimiento de lo que actualmente se está investigando sobre el tema para presentarlo en el libro y así poder alcanzar un trabajo de gran valor científico.

De este modo, destaco el importante trabajo de los autores al mostrar las fuentes consultadas, toda vez que, al proponerse una nueva metodología de análisis, el lector necesita conocer y entender la complejidad, la originalidad y la importancia del tema. El cuidado en dejar asentadas todas las bases científicas evidentes fue tan grande, que los autores también presentan una metodología para la revisión sistemática sobre los conceptos abordados en el libro, estructurado de forma didáctica y de fácil comprensión para los lectores. Así, puedo afirmar que se trata de una obra única y con base teórica adecuada, con gran relevancia científica para el área de la arquitectura.

Como toda buena investigación, la información nos lleva a pensar sobre otras realidades, en mi caso, más específicamente, sobre la ciudad de São Paulo, Brasil, y preguntarnos cómo otros asentamientos urbanos responderán a los cambios climáticos y quizá, en última instancia, a interrogarnos sobre nuestra propia actuación dentro de los sendos contextos a los que pertenecemos, ya sea como gestores, arquitectos o ciudadanos.

Este libro es sin duda instrumento de trabajo fundamental para estudiantes y profesionales vinculados con la arquitectura y el urbanismo.

Grace Tibério Cardoso

Doctora en Ciencias de la Ingeniería Ambiental y Maestra en Ciencia e Ingeniería de Materiales por la Universidad de São Paulo -USP. Docente del Programa de Posgrado *Stricto Sensu* en Arquitectura y Urbanismo de la Facultad Meridional IMED (PPGARQ-IMED).

Passo Fundo-RS, Brasil, a 3 de septiembre de 2017



El propósito de esta investigación fue describir los conceptos de resiliencia, cambio climático y vulnerabilidad aplicados en Bogotá. Para probar la hipótesis propuesta de que es posible proponer un modelo básico de Territorio Resiliente Eficiente (TRE) que responda de manera eficaz a los cambios climáticos, teniendo la capacidad de adaptación a eventos extremos en contextos específicos. Esta hipótesis busca relacionar la variable independiente denominada resiliencia con las variables dependientes cambio climático y vulnerabilidad en áreas urbanas, que pueden ser examinadas por las variables de control habitabilidad y eficiencia en entornos urbanos definidos, como es el caso de la ciudad de Bogotá.

Los retos futuros que tiene Bogotá van más allá de su dimensión ambiental, e incluyen diferentes aspectos relacionados con las actividades sociales y económicas que desarrollará la población sobre las áreas urbanas. En consecuencia, el uso extensivo de grandes superficies urbanizadas en Bogotá ha causado el incremento de islas de calor en la ciudad, fenómeno que va en detrimento de la calidad del hábitat urbano. Esta acción, conjugada con una mayor demanda de agua y energía por parte de la población, pone en riesgo los servicios básicos de la

ciudad. Esta presión sobre el territorio amplía la vulnerabilidad urbana a los eventos extremos de calor.

Una alternativa a esta problemática es desarrollar el concepto de territorio resiliente dentro de los procesos de construcción de la ciudad. Un territorio resiliente se define como la superficie que contiene múltiples espacios, que relacionan diferentes actores para caracterizar un área urbana. Es indiscutible que el cambio climático es una anomalía que afecta de manera directa al hombre. Por lo tanto, las respuestas a esta problemática deben estar dirigidas a diseñar ciudades que permitan una adecuada adaptación a este fenómeno.

En esta investigación se observó que existe una clara relación entre los conceptos de diseño de edificación resiliente, eficiencia energética, materiales y análisis de ciclo de vida. El diseño de territorios orientados a la resiliencia es la mejor opción para la reducción de las emisiones CO₂ y la construcción de una buena habitabilidad, que permita una óptima sostenibilidad dentro de un territorio urbano y que, a su vez, garantice la habitabilidad de la especie frente al cambio climático. El resultado de esta investigación fue un piloto de simulación estocástica simple, generando una metodología de evaluación con el propósito de identificar el comportamiento de lo que se ha denominado, en esta investigación, un Territorio Resiliente Eficiente (TRE), capaz de acomodarse a las nuevas situaciones ambientales.



Problema de investigación

¿Cómo desarrollar territorios resilientes que reduzcan las emisiones de CO₂, y garanticen factores como la habitabilidad y la eficiencia en Bogotá?

Campo

Los campos de acción de esta investigación son la Arquitectura y el Urbanismo.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un modelo de territorio resiliente que responda eficientemente al cambio climático, aplicado a un área de Bogotá.

Objetivo específicos

- Identificar las condiciones del cambio climático que afectan las edificaciones y las áreas urbanas en Bogotá.
- Identificar y evaluar materiales de construcción y variables de consumo, de las edificaciones en Bogotá que puedan presentar capacidad de resiliencia en respuesta al cambio climático.
- Proponer un modelo base de territorio resiliente, que responda eficientemente al cambio climático en el contexto urbano de Bogotá.

Hipótesis

La hipótesis propuesta para esta investigación fue: “Es posible proponer un modelo básico de Territorio Resiliente Eficiente (TRE) que responda de manera eficaz a los cambios climáticos, teniendo la capacidad de adaptación a eventos extremos en contextos específicos”. Esta hipótesis busca relacionar la variable independiente, denominada resiliencia, con las variables dependientes cambio climático y vulnerabilidad en áreas urbanas, que puede ser examinada por las variables de control habitabilidad y eficiencia en entornos urbanos definidos, como es el caso de la ciudad de Bogotá.

Novedad científica

Es la primera vez que se sistematiza con un enfoque científico el concepto de resiliencia, desde el campo de la Arquitectura. Por tanto, se propone un modelo matemático básico, que permita a futuro explorar nuevas herramientas aplicables a las áreas de Arquitectura y Urbanismo. Asimismo, este trabajo abre una nueva oportunidad para incluir las Ciencias Básicas en el campo de la Arquitectura y el Urbanismo. El enfoque multidisciplinar de este trabajo representa una novedad respecto a estudios precedentes.

Resultados alcanzados

- Modelo teórico básico para la evaluación de un territorio resiliente y eficiente, aplicado a áreas urbanas.
- Confirmación de la viabilidad del modelo con un piloto experimental, que permitirá a futuro desarrollar modelos y herramientas que puedan medir la resiliencia y dar respuesta a los fenómenos del cambio climático.
- Recomendaciones para proponer nuevas metodologías para el diseño de áreas urbanas y la construcción de herramientas de medición de la resiliencia.

Introducción

El propósito de esta investigación fue describir los conceptos de resiliencia, cambio climático y vulnerabilidad aplicados en Bogotá, para probar la hipótesis propuesta de que “es posible proponer un modelo básico de Territorio Resiliente Eficiente (TRE) que responda de manera eficaz a los cambios climáticos, teniendo la capacidad de adaptación a eventos extremos en contextos específicos”. Esta hipótesis busca relacionar la variable independiente, denominada resiliencia, con las variables dependientes cambio climático y vulnerabilidad en áreas urbanas, que pueden ser examinadas por las variables de control habitabilidad y eficiencia en entornos urbanos definidos, como es el caso de la ciudad de Bogotá.

En este sentido, el cambio climático es un peligro para la habitabilidad de los seres humanos y es necesario reducir este riesgo para minimizar los impactos ambientales que causa (Carter *et al.*, 2015). Por ejemplo, el 76% de los colombianos vive en ciudades que no están preparadas para responder a las nuevas condiciones extremas que está produciendo este fenómeno (Gamboa, 2011). Además, las consecuencias de este suceso afectan a los edificios, ya que los hace más vulnerables a las condiciones climáticas adversas. Los edificios construidos en las ciudades colombianas no están en condiciones de resistir el cambio climático.

Por ejemplo, Bogotá es altamente vulnerable al cambio climático (Ideam, 2014a). Efectivamente, el territorio bogotano es vulnerable a los cambios extremos en los patrones de precipitación y temperatura (ver figura 1), causados por el impacto de los procesos de urbanización y transformación sobre los ecosistemas naturales (Ideam, 2014a). Por tanto, el concepto de habitabilidad toma especial importancia como factor de sostenibilidad y calidad de vida urbana. Igualmente, Bogotá necesita un cambio urgente en las políticas de construcción y gestión de la ciudad y sus edificaciones, que responda a los efectos del cambio climático.



Figura 1. Precipitación extrema en la ciudad de Bogotá, 26 de enero de 2015.
Fuente: Rolando Cubillos

En consecuencia, el uso extensivo de grandes superficies urbanizadas en Bogotá ha causado el incremento de islas de calor en la ciudad, fenómeno que va en detrimento de la calidad del hábitat urbano. Esta acción, conjugada con una mayor demanda de agua y energía por parte de la población, pone en riesgo los servicios básicos de la ciudad. Se estima que, para el 2050, el Distrito Capital

tendría una población cercana a los 11.483.790 habitantes (Ideam, 2014b). Esta presión sobre el territorio amplía la vulnerabilidad urbana a los eventos extremos de calor. Al mismo tiempo, son más frecuentes los incendios forestales en las zonas de bosques aledañas a la ciudad (Ideam, 2014c).

Otro síntoma del cambio climático es el incremento de los eventos de precipitaciones extremas (ver figura 2), que causan inundaciones en áreas desprotegidas de la ciudad (Ideam, 2014c). Según el Ideam¹ (2014c), el municipio de Soacha y las localidades de Suba, Usaquén, Barrios Unidos y Kennedy son las áreas urbanas de la ciudad más vulnerables al cambio climático, debido a la alta densidad poblacional proyectada y a los cambios en la disposición del agua, los eventos extremos y los desastres. Sin embargo, según el Ideam (2014c), en general Bogotá presenta una media capacidad de adaptación al cambio climático.

Los retos futuros que tiene la ciudad van más allá de su dimensión ambiental, e incluyen diferentes aspectos relacionados con las actividades sociales y económicas que desarrollará la población sobre las áreas urbanas. Se vislumbra, a futuro, una mayor frecuencia en la aparición de eventos extremos, en donde la ciudad tendrá un clima más seco o más húmedo, dependiendo del microclima de cada zona urbana (Ideam *et ál.*, 2012). Es decir, los patrones de producción y consumo de la ciudad van a estar altamente influenciados por el comportamiento del clima, dejando a un lado la identificación de nuevas oportunidades de adaptación que estos escenarios pueden aportar para el desarrollo de la misma (Ideam *et ál.*, 2012).



Figura 2. Impacto en las edificaciones por precipitación extrema en la ciudad de Bogotá, 26 de enero de 2015.

Fuente: Rolando Cubillos

Otro factor importante es la vulnerabilidad urbana. Frente a estos eventos climáticos ¿cuál es el nivel de vulnerabilidad de la ciudad? y ¿cómo esta vulnerabilidad se relaciona con la adaptabilidad y capacidad de respuesta de la ciudad? Estos argumentos permiten identificar una alta necesidad de adaptación como respuesta al cambio climático. Es decir, se necesita generar un hábitat sostenible para los habitantes de la ciudad frente a dicho fenómeno. Esto es particularmente válido en la actual situación de la ciudad. Según estudios realizados, las ciudades son las principales fuentes emisoras de CO₂ y consumen entre 60% y 80% de la producción de la energía (García *et ál.*, 2013). Es por esto que hoy se observa una preocupación por el tema desde las instituciones públicas y privadas, las cuales han desarrollado diferentes estrategias para dar respuesta a esta problemática.

Una alternativa para la solución de esta problemática es desarrollar el concepto de territorio resiliente, dentro de los procesos de construcción de la ciudad.

¹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

Un territorio resiliente se define como el espacio en donde se encuentran las múltiples dimensiones que caracterizan un área urbana, que deben permitir a través de sus interrelaciones un equilibrio entre sus diferentes componentes y actores. Para el conocimiento de este concepto aplicado al territorio de Bogotá, se podría preguntar: ¿Cómo funciona un territorio resiliente? (Cortés & Cubillos, 2014, p. 3).

Asimismo, es importante establecer indicadores de evaluación de la resiliencia con mayor precisión, para identificar las variables de análisis que aportan a la ciudad, bajo el concepto de eficiencia. Por ejemplo, la industria de la construcción a nivel mundial impacta en un 50% el consumo de recursos; mientras que, por ejemplo, la producción de alimentos es uno de los procesos que genera altas emisiones de CO₂.

A continuación, se presenta el análisis de la revisión bibliográfica, en el cual se expondrá, por temas, las variables de análisis que permitieron construir el marco teórico de la investigación. La revisión está estructurada de la siguiente manera: en primer lugar, se explicará la metodología de la revisión bibliográfica; en segundo lugar, se explicará el concepto de diseño de edificaciones resilientes; en tercer lugar, se hablará sobre el concepto de eficiencia energética; en cuarto lugar, se expondrá un análisis sobre el papel actual de los materiales en la construcción; y, finalmente, se explicará la importancia del concepto de ciclo de vida en la construcción de edificaciones y áreas urbanas.

Metodología de la revisión bibliográfica

Para la revisión bibliográfica se establecieron las siguientes variables de estudio, relacionadas con la pregunta de investigación: diseño de edificaciones resilientes, eficiencia energética, materiales y ciclo de vida. Por otro lado, se estableció un objetivo metodológico general y tres objetivos metodológicos secundarios. Estos fueron:

Objetivo metodológico general

- Seleccionar el material de publicaciones primarias para la construcción de un marco teórico, que permita dar respuesta a la pregunta de investigación.

Objetivos metodológicos secundarios

- Seleccionar artículos indexados, publicados entre los años 2006 y 2015.
- Clasificar el material encontrado por temas, de acuerdo a las variables seleccionadas y mencionadas anteriormente.
- Realizar una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas.

El procedimiento consistió en la revisión de artículos en revistas indexadas internacionalmente, a través de bases de datos como EBSCOhost, ISI y Scopus, de los cuales el 90% fue publicado en idioma inglés y el otro 10% en idioma español. Dentro del análisis de la información, se revisaron 50 artículos, publicados entre el año 2006 y el 2015, de los cuales el 55% corresponde al tema de investigación denominado materiales (28 artículos revisados). En segundo lugar, se revisaron artículos referentes al tema resiliencia en edificaciones, de los cuales 23 corresponden al 45% de las publicaciones indexadas. En tercer lugar, se revisó el tema de la eficiencia energética, en el

que se revisaron 20 artículos, que corresponden al 40% de la revisión general. Y, por último, el tema referente al análisis de ciclo de vida (ACV), en donde se revisaron 8 artículos, que corresponden al 15% de las publicaciones indexadas (ver figura 3).

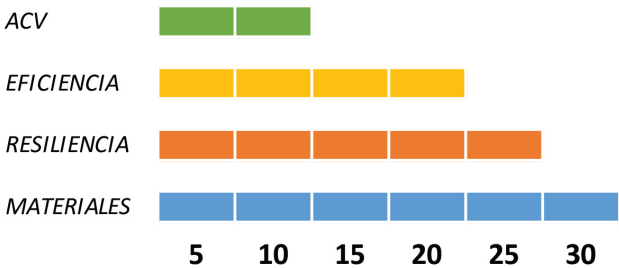


Figura 3. Número de artículos sobre ERA, relacionados con los tópicos de estudio.
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos Esnob, Isi y Scopus.

La revisión contempló el análisis de las publicaciones, por región y países, que han profundizado sobre la adaptabilidad de las edificaciones en el siglo XXI, el cambio climático y han logrado disminuir el impacto ambiental generado por la construcción en las grandes ciudades del mundo. Norte América ocupa el primer lugar, con 21 de los 50 artículos revisados; en segundo lugar está Europa, con 20 artículos publicados; en tercer lugar Asia, con 8 publicaciones indexadas; y en cuarto lugar Australia y Sur América, con 6 artículos publicados. En el análisis por países, se encontró que Estados Unidos es el país que mayor publicaciones tiene a escala mundial, con 16 artículos en las 50 publicaciones revisadas, seguido de Canadá y España, con 4 artículos cada país, y en tercer lugar Portugal, Suecia y Colombia, que han publicado 3 artículos científicos por país en cada región a la que pertenecen (ver figuras 4 y 5).

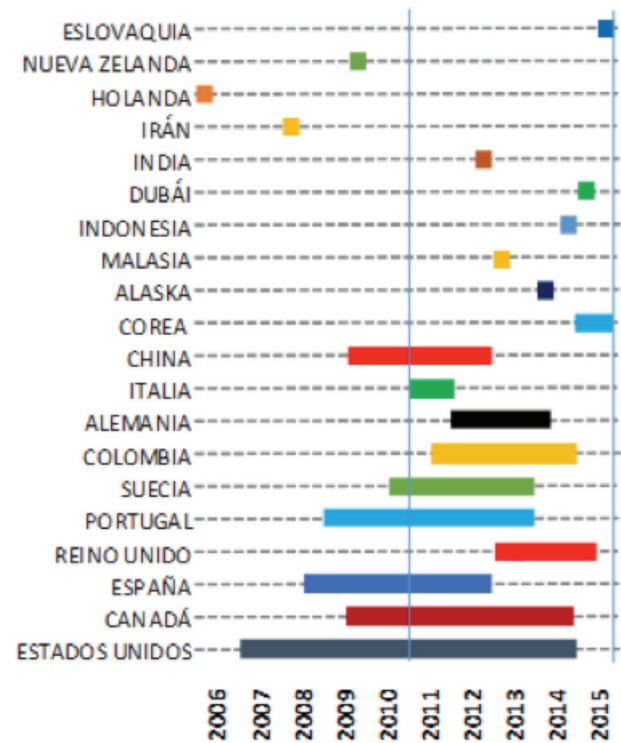


Figura 4. Número de artículos sobre ERA publicados por país y año de publicación.
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos Esnob, Isi y Scopus.

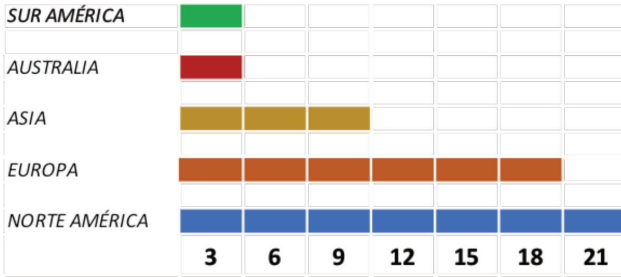


Figura 5. Número de artículos sobre ERA publicados por continente.
Fuente: elaboración propia a partir de bases de datos Esnob, Isi y Scopus.

Diseño de edificaciones resilientes

El cambio climático tendrá un impacto en la intensidad y frecuencia de la temperatura, la precipitación, la erosión costera, la calidad del aire, las plagas y los incendios forestales (Randolph & Rider, 2014). Esta revisión ofrece un panorama de oportunidades para el sector de la construcción, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: 1) los riesgos asociados con el cambio climático y 2) las estrategias para evitar o mitigar los riesgos en edificios existentes. Los riesgos, asociados a los propietarios y operadores de edificios, dependen de si se encuentran en un clima frío, caliente o húmedo. Las estrategias se clasifican según las siguientes categorías: sistemas energéticos, sistemas de agua, emplazamiento y materiales.

Por otro lado, en la actualidad se busca orientar el sector de la construcción hacia procesos constructivos libres de carbón (Applegath, 2013). Si se logra transformar el mercado, los autores que hablan sobre el tema creen que se puede proporcionar información sobre el diseño de edificios eficientes de manera regenerativa, produciendo servicios ambientales y aumentando su capacidad de resiliencia, para proporcionar una rica experiencia y operar en armonía con el hábitat urbano local y regional.

Sobre este aspecto, la contribución de los edificios en todo el mundo hacia el consumo de energía, tanto residencial como comercial, ha aumentado considerablemente. Las cifras alcanzan entre el 20% y el 40% en los países desarrollados, y ha superado a los otros grandes sectores, como son el industrial y el transporte (Pérez-Lombard, Ortiz & Pout, 2008). Asimismo, el crecimiento de la población, la creciente demanda de servicios de construcción y los niveles de confort, junto con el aumento en el tiempo de los usuarios dentro del edificio, evidencia que

la tendencia al alza en la demanda de energía continuará en el futuro. Por esta razón, la eficiencia energética de los edificios es hoy un objetivo primordial en la política energética a nivel regional, nacional e internacional.

Las ciudades necesitan una nueva agenda de planificación, con el fin de estar preparadas para los duros desafíos ambientales del siglo XXI. Según Bogunovich (2009), la definición de esta agenda es imposible sin revisar un enfoque sostenible, que incluya la capacidad de resiliencia en un entorno urbano. Para el autor, en la mayoría de las partes del mundo se pierde la batalla por la ciudad compacta, y sugiere que debemos dirigir nuestras energías creativas hacia la implementación del diseño sostenible y tecnologías limpias a escala masiva, para mitigar la imparable expansión urbana.

Por otro lado, Burleson (2011) plantea que la resiliencia no tiene que significar un esfuerzo por volver a un punto pasado, sino que es más bien la capacidad de hacer frente eficazmente a la adversidad. Factores como la eficiencia energética, la gestión del agua y la construcción de un hábitat urbano resiliente son solo algunos ejemplos de los esfuerzos para mitigar y mejorar las habilidades de las comunidades, con el fin de adaptarse al cambio climático. Finalmente, el autor plantea que la adaptación puede ser global, regional, nacional, local e individual. Además, puede ser a corto o largo plazo, así como proactiva o reactiva.

Algunos autores plantean que la diversidad cultural es cada vez mayor en todas las ciudades del mundo, como consecuencia de la urbanización (Colding & Barthel, 2013). La biodiversidad está disminuyendo, con la consiguiente pérdida de los servicios ambientales. Esta diversidad juega un papel fundamental en la creación de resiliencia de los ecosistemas; sin embargo, no está tan claro qué papel juega

la diversidad cultural en la capacidad de recuperación de los edificios y de los sistemas urbanos. Para ello, los autores proponen la integración cultural, a través de la participación ciudadana, en la gestión del suelo urbano y promover, de esta manera, la creación de resiliencia urbana.

En esta vía, autores como Dodman (2009) proponen una revisión analítica de la interacción entre la densidad urbana, el cambio climático y el aumento del nivel del mar. Además, centra su análisis en dos temas principales: 1) la interacción entre la densidad urbana y la generación de gases de efecto invernadero, y cómo esto afecta a las estrategias de mitigación; y 2) las consecuencias del cambio climático en los asentamientos urbanos de diferentes densidades de población, y cómo esto afecta a las estrategias de adaptación. En todo momento hay un reconocimiento de que el cambio de las densidades de población, en centros urbanos, será afectado por el cambio ambiental global.

Otros autores identificaron y analizaron los marcos de resiliencia e indicadores correspondientes, los cuales están disponibles para evaluar la arquitectura y la capacidad de recuperación de la infraestructura urbana. Con estas herramientas, los autores determinaron:

1) las condiciones en que la arquitectura y la capacidad de resiliencia de la infraestructura pueden ser definidas y medidas; 2) los atributos de los indicadores adecuados para orientar acciones e inversiones; y 3) los criterios adecuados para seleccionar y elaborar estos indicadores.

Cabe anotar que la urbanización de todo el mundo se correlaciona con la creciente vulnerabilidad a los peligros naturales, sísmicos y otros. El diseño basado en el desempeño y la evaluación integrada de los edificios sostenibles,

y con gran capacidad resiliente pueden ofrecer alternativas innovadoras para la recuperación del hábitat urbano ante los desastres (Welsh-Huggins & Liel, 2014). Los autores proponen una metodología de evaluación del ciclo de vida que une los distintos ámbitos de la sostenibilidad, el riesgo y la resiliencia, para avanzar en el diseño de edificios e identificar puntos de influencia, para mejorar la mitigación de desastres y la recuperación urbana.

Asimismo, propusieron un marco “sostenible-resiliencia”, que se puede utilizar para analizar las implicaciones de la reconstrucción de desastres, la cuantificación de indicadores ambientales e indicadores socio-económicos de la construcción del desempeño durante su vida útil. Un buen ejemplo de la aplicación de esta metodología se desarrolló en la reconstrucción de la ciudad de Christchurch, en Nueva Zelanda.

Otra variable importante sobre resiliencia es el problema de la reutilización adaptativa de edificios históricos (Mofidi, Moradi, Akhtarkavan y Akhtarkavan, 2008), en donde se presenta la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación sostenible para los edificios históricos existentes, que respondan, de manera óptima, a los cambios climáticos. Los autores encontraron que la rehabilitación de las estructuras históricas existentes es casi siempre superior a la construcción nueva o de reemplazo, en función de los diversos aspectos de la sostenibilidad. Al final, se llegó a la conclusión de que, con el fin de buscar una solución a los problemas de adaptación, debe haber un enfoque multidimensional. Para ello se propone el uso de técnicas y métodos difusos multicriterio, para buscar soluciones a los problemas en los edificios históricos en respuesta a los cambios climáticos.

Por otro lado, en la Unión Europea y Alemania, los temas emergentes en el desarrollo espacial y la ordenación del territorio son: el cambio climático, la construcción de la capacidad de resiliencia y la reducción de la vulnerabilidad. Según Birkmann, Bach y Vollmer (2012), es importante subrayar la evaluación de la vulnerabilidad, como información base para la promoción de la resiliencia y el potencial de adaptación de un hábitat urbano. Finalmente, los autores identificaron la necesidad de mejorar los vínculos entre el ordenamiento territorial y la protección de los pobladores.

Un estudio realizado por el Consejo de Estrategias Tecnológicas del Reino Unido examinó las amenazas y oportunidades que presentan las técnicas industrializadas y de fomento de la vivienda, a la luz del futuro aumento en las inundaciones previstas por el cambio climático (Keeffe & McHugh, 2014). Los autores muestran que los rendimientos térmicos de las viviendas, construidas con las actuales reglas de construcción del Reino Unido, no son adecuados para hacer frente a los cambios del clima y, a la luz de esto, se desarrollaron diseños detallados para un nuevo tipo de vivienda, el cual pueda producirse industrialmente respondiendo de manera resiliente al clima. Asimismo, uno de los criterios es que sea asequible.

El nombre del proyecto es IDEAHaus, un concepto de vivienda modular que responde, entre otras cosas, a la inundación a una profundidad de 750 mm. La vivienda también está diseñada para utilizar refrigeración pasiva, lo que reduce drásticamente la cantidad de sobrecalentamiento, tanto hoy en día como a futuro.

En el caso de Norteamérica (Boyle *et al.*, 2013), específicamente en Canadá, los eventos climáticos que se han

presentado en los últimos años han permitido reflejar una idea de lo que podría significar el impacto del cambio climático en la infraestructura del país, y conducen a factores de estrés económico, social y ambiental, generando así la necesidad de construir sistemas de infraestructura robustos y resilientes en todo el país. Cada vez es más claro que las acciones se deben tomar no solo para reducir la generación de gases de efecto invernadero, que estimulan el cambio climático, sino también para hacer frente a los impactos negativos del cambio climático a través de la adaptación.

En Estados Unidos, el tema de la resiliencia en el área de la construcción se ha convertido en un tema de seguridad nacional (Jennings, Vugrin & Belasich, 2013). Según los autores, la capacidad de resiliencia de la infraestructura se ha convertido en un objetivo prioritario para los organismos gubernamentales. Las iniciativas recientes se han centrado en el diseño de edificios resilientes, y uno de los enfoques que se examina es la implementación de un programa de certificación para edificaciones resilientes. Una de las principales conclusiones del estudio es que el término resiliencia es desconocido para muchos en la industria de la construcción. Además, se encontró que es necesario relacionar las inversiones orientadas a la resiliencia en las edificaciones con un modelo de asociación público-privada que pueda implementarlas, de manera exitosa, en el sector de la construcción.

Sobre este aspecto, en los Estados Unidos la medición y la mejora de la capacidad de resiliencia en la construcción se han convertido en un imperativo nacional (Stillwell, Reis, Von Berg & Mayes, 2014). Los métodos actuales para definir y evaluar la resiliencia son incompatibles, difíciles de aplicar o se presenta una falta de normalización

y verificación. Además, diversas instituciones privadas y gubernamentales han alineado constantemente el desarrollo del sistema de calificación, como una prioridad para evaluar el impacto ambiental y de cambio climático en los EE.UU. Una de estas instituciones es el Consejo Americano de Resiliencia quien, a través de su Certificación en Ingeniería Resiliente (Core®), ha generado edificios resilientes de fácil construcción y altamente cotizados. La clasificación de la certificación permite a los propietarios, y a otras partes interesadas en la evaluación y comunicación entre las partes, aumentar la resiliencia de manera objetiva y coherente. El objetivo de estos esfuerzos es convertirse en el estándar para cuantificar el valor de la capacidad de resiliencia, y una métrica clave para la debida diligencia en las transacciones de bienes inmobiliarios.

En Colombia, un buen ejemplo de la aplicación de estos temas es la ciudad de Manizales, la cual está incorporando en sus planes de desarrollo urbano el concepto de la adaptación al cambio climático. A partir del análisis de la aplicación de este tipo de normativa, se busca construir un plan de acción ambiental para incorporar la reducción del riesgo de desastres en las políticas de desarrollo local, y los planes locales de uso del suelo (Hardoy & Velásquez, 2014). Lo que se busca es un reconocimiento de las debilidades que conduce a mejores formas de abordar los riesgos relacionados con la resiliencia, el clima y los retos de adaptación.

Eficiencia energética

En cuanto al tema de la eficiencia energética aplicada a las edificaciones, algunos autores (Mehdipoor, Dahlan, Berardi & GhaffarianHoseini, 2013) llaman la atención sobre las actuaciones de energía sostenible de los edificios, para identificar los parámetros influyentes con base en los logros exitosos contemporáneos. Como resultado, la revisión analítica confirma que el rendimiento energético de edificios sostenibles se ha transformado razonablemente, disminuyendo el consumo de energía en el sector de la construcción.

Una idea importante es planteada por Yuan (2012), quien afirma que la concepción de la estética arquitectónica contemporánea debe estar ajustada a las nuevas necesidades de las edificaciones sostenibles, en términos del cambio climático, para generar una nueva conciencia respecto a temas como el ahorro energético, la reducción del consumo de materiales y la producción de bajas emisiones de carbono. Entonces, se requieren técnicas y métodos de apoyo investigativo en el área de la construcción. Es crucial, para una buena construcción sostenible, el desarrollo de procesos tecnológicos que permitan el procesamiento de las materias primas, de manera limpia y con mínimos impactos ambientales.

En este caso, los nuevos desarrollos tecnológicos en la construcción se han orientado hacia la reducción de la brecha entre la necesidad de un menor impacto ambiental y la cada vez mayor necesidad de confort en las edificaciones (Dutil, Rousse & Quesada, 2011). Estos desarrollos fueron dirigidos generalmente a la reducción del consumo de energía durante el proceso de construcción. Por ejemplo, para un edificio de bajo consumo de energía térmica, la energía incorporada en

los materiales de construcción se convierte en un componente importante de medición de la huella ambiental.

Por ejemplo, los techos verdes es una técnica de enfriamiento pasivo para detener la radiación solar entrante y evitar que llegue a afectar la estructura del edificio. Se han realizado muchos estudios, en los últimos 10 años, para considerar las posibles ventajas de la energía en la construcción de techos verdes (Castleton, Stovinb, Becke & Davison, 2010). Esta técnica puede ofrecer beneficios reduciendo la calefacción en invierno, así como la refrigeración en verano. La información revisada pone de manifiesto las situaciones en las cuales puede haber un mayor ahorro de energía en los edificios a través de esta técnica.

En el Reino Unido, se considera que los edificios más antiguos con mal aislamiento térmico son los que más se benefician de un techo verde. La normativa vigente de construcción exige altos niveles de aislamiento en la cubierta. Por tanto, la técnica de las cubiertas verdes tiene un gran potencial de rehabilitación para la adaptación de las cubiertas en los edificios del Reino Unido. Sin embargo, todavía es crucial implementar nuevas estrategias para identificar y desarrollar soluciones energéticas eficientes asociadas a los edificios, para hacer frente a las futuras demandas de energía. Del mismo modo, los resultados ponen de relieve que las actuaciones energéticas sostenibles, asociadas con tecnologías integradas y sistemas de energías renovables, todavía se entrelazan con importantes desafíos relacionados con los parámetros fundamentales de costo, mantenimiento y operación.

Es importante anotar que, en el sector de la construcción del Reino Unido, se ha identificado la necesidad de una agenda de sostenibilidad. La demanda de edificios sostenibles es cada vez más importante en este sector.

Las grandes empresas de la construcción en este sector han comenzado a ser líderes hacia la sostenibilidad, a través de la colaboración con sus clientes y cadenas de suministro, tanto en los productos como en las operaciones (Dangana, Pan & Goodhew, 2012). Sin embargo, no está claro cómo los beneficios de los clientes pueden ser maximizados y reducidos al mínimo los riesgos asociados, con el fin de agregar valor y diferenciar la producción sostenible de la construcción convencional.

En la revisión de la definición de construcción sostenible (Berardi, 2013), se evidencia que existen muchas dificultades para identificar la sostenibilidad en el entorno construido. Por ejemplo, los sistemas para las evaluaciones de sostenibilidad son a menudo insuficientes para reconocer la sostenibilidad de los edificios, dado el fuerte enfoque medioambiental y tecnológico de los sistemas. Se concluye que un edificio es sostenible cuando plantea un metabolismo y favorece una regeneración del entorno construido.

Otros autores, como por ejemplo Chaudhry, Calautit & Hughes (2015), proponen un análisis numérico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar, por ejemplo, el efecto de la distribución del viento sobre las edificaciones. Para ello, se propone utilizar los datos numéricos con el fin de medir el potencial de generación de energía de las turbinas de viento integradas a las edificaciones, determinando la respuesta de la dirección predominante del viento. Este trabajo pone de relieve el potencial de la utilización de la dinámica de fluidos computacionales avanzadas, para el factor del viento, en el diseño de cualquier entorno arquitectónico.

En Estados Unidos (Newsham, Mancini & Birt, 2009), el Consejo de Construcciones Sostenibles llevó a cabo un nuevo análisis de los datos suministrados por 100

edificios con certificación LEED, en el área de comercio e institucionales. Estos datos fueron comparados con los datos de aprovechamiento energético que se presentan en el país. También se examinó el uso de energía por nivel de certificación LEED y por los créditos relacionados con la energía, alcanzados en el proceso de certificación. En promedio, los edificios LEED utilizan 18 a 39% menos energía por área de suelo que sus contrapartes convencionales. Sin embargo, del 28 al 35% de los edificios LEED utilizan más energía que sus contrapartes convencionales.

Además, el rendimiento energético medido por edificio LEED tenía poca correlación con el nivel de certificación del edificio o el número de créditos de energía logrados en el tiempo de diseño. Por lo tanto, se concluyó que, a nivel social, los edificios sostenibles pueden contribuir al ahorro sustancial de energía, pero aún queda trabajo por hacer para definir los esquemas de clasificación de los edificios sostenibles, con el fin de asegurar un éxito más consistente en el nivel del edificio individual.

En este orden de ideas, si el entorno construido tiene un impacto sustancial en la economía, la sociedad y el medio ambiente, se entendería que la evaluación ambiental de los edificios ha ganado importancia sustancial en la industria de la construcción. Según los autores Tatari & Kucukvar (2011), se ha propuesto un modelo de red neuronal artificial para predecir el costo de la certificación LEED en edificios sostenibles. Con esta herramienta es posible verificar la viabilidad del modelo y realizar el análisis de regresión múltiple, para utilizarlo como modelo de evaluación comparativa. La validación de esta herramienta permite revelar las relaciones significativas entre las categorías LEED y costo de las edificaciones.

Lo anterior permite opciones de decisión que pueden guiar a los propietarios para calcular los costes basados en créditos LEED.

En el caso de Colombia, varios autores (Penagos & González, 2014) plantean, por ejemplo, evaluar el modelo existente de gestión del agua en las ciudades, ya que este se basa en sistemas de gran escala que tienen el agua ubicada a decenas de kilómetros de los municipios que la suministran. El agua es tratada para el consumo, pero las aguas residuales, que se descargan de nuevo al entorno a través de los sistemas de alcantarillado, en la mayoría de los casos no son tratadas, siendo una fuente importante de contaminación ambiental y de riesgos para la salud pública. Mientras tanto, el agua lluvia, que se obtiene de los tejados y las calles, se considera un problema, pues es también dispuesta en las alcantarillas como otro tipo de aguas residuales.

Por consiguiente, los autores proponen un cambio de paradigma, en donde el edificio debe estar en el centro de esta transformación. Como caso de estudio, explican un nuevo modelo en los edificios de la ciudad de Medellín, en los que se han implementado sistemas de agua sostenibles, integrando dispositivos de bajo consumo y la recolección de agua lluvia, reciclaje de aguas grises y captación de aguas subterráneas. El costo de inversión es alto, pero es devuelto en 5 años, lo que demuestra la eficiencia ecológica al ser una opción económicamente sostenible a esta escala.

Por otro lado, autores como Ozuna, Rivera, Vargas & Guevara (2011) analizaron que en Colombia las actividades de construcción representan el 6,5%, incluyendo la construcción de la infraestructura, proyectos residenciales, comerciales e industriales. La tasa de crecimiento,

para el año 2010, fue del 4,3%, que se suma a la creciente demanda de viviendas, debido al desastre ambiental causado por las inundaciones y una enorme presión sobre la industria de la construcción.

Por estas razones, se han realizado esfuerzos para minimizar el impacto ambiental causado por los proyectos de construcción durante la última década. Sin embargo, los resultados varían entre regiones, e incluso entre ciudades. En Colombia, muchas empresas de construcción están destinando recursos sustanciales para entrar satisfactoriamente en los mercados internacionales, mediante el cumplimiento de las demandas de sus clientes en condiciones sostenibles. Según los autores, el conocimiento y la percepción que el público en general, y los profesionales como ingenieros civiles y arquitectos, tienen sobre la sostenibilidad en los proyectos de construcción influirán en la reacción del país a esta tendencia relativamente nueva.

En estos términos, por ejemplo, hoy el diseño paramétrico en Colombia se ha convertido en una buena opción para el análisis y la propuesta de soluciones de envolventes en las edificaciones (Velasco & Robles, 2011). Los autores han ideado una estructura paramétrica basada en definiciones factoriales, con la que se tienen en cuenta los análisis de ciclo ambiental, estructural y de vida para determinar las posibilidades de diseño posteriormente definidos en términos de su configuración física, materiales constituyentes, procesos de construcción y comportamiento dinámico. Se hace especial hincapié en la energía integrada y el desempeño funcional de los diseños resultantes. El modelo metodológico propuesto se presenta gráficamente y su potencial práctico ilustrado en un caso particular de aplicación. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que este es un trabajo en progreso,

con el fin de construir una metodología de simulación para arquitectos y diseñadores.

Materiales

Hay que tener en cuenta que, según el Diccionario de la lengua española (Real Academia Española, 2017) en ingeniería se llama resiliencia a “la capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido”. Dentro de las publicaciones revisadas, se evidencia un gran interés por establecer criterios para mejorar la eficiencia de los materiales seleccionados para la construcción de edificaciones. Así mismo, para lograr equilibrar el impacto ambiental causado durante la fase de cambio de material (PCM), la fabricación y su instalación. Un ejemplo de ello es la cerámica. Los autores Aranda-Usón, Ferreira, López-Sabirón, Mainar-Toledo & Zabalza (2013) concluyeron que el uso de PCM puede reducir el consumo total de energía y el impacto ambiental.

En esta misma línea, otros estudios señalan que algunos materiales reducen la huella de carbono y son más eficientes. La madera es un buen ejemplo. Los autores Doodoo, Gustavsson & Sathre (2012) concluyen que la madera es un material eficaz para reducir el consumo de energía primaria en el entorno construido, en comparación con el concreto, que trae otros beneficios como generador de masa térmica, pero que, en su proceso de fabricación, posee un alto consumo energético.

Para seleccionar y especificar correctamente los materiales de construcción, se necesita integrar el análisis de estos productos en el proceso de diseño, con el fin de sacar provecho de las ventajas económicas que brindan los procesos sostenibles en el área de la construcción

(Spiegel & Meadows, 2010). Para esto, es fundamental la reducción de residuos y la mejora de la eficiencia energética y, de esta forma, promover el cumplimiento en la búsqueda del código adecuado.

En Estados Unidos se analizan los impactos ambientales desde los materiales. En un reciente estudio, se demostró que los mayores impactos ambientales de la producción de materiales de construcción son producidos por: el hormigón, el acero estructural, los paneles fotovoltaicos (PV), inversores y la grava (Thiel *et al.*, 2013). Los alcances en las publicaciones revisadas señalan que algunas investigaciones exploran, de manera responsable y consciente, el uso de materiales que pueden producir beneficios ambientales en los edificios (Nordby & Shea, 2013). En este artículo se analiza cómo los materiales adecuados, relacionados con la masa térmica e higroscópica, se pueden utilizar para lograr la eficiencia energética y la buena calidad del aire interior, y cómo estos beneficios se pueden incluir en el contexto del análisis de ciclo de vida (ACV).

Los principales aportes de los países de la Unión Europea (UE) están en el documento que traza los objetivos del desarrollo del milenio (ODM). Los autores Pacheco-Torgal & Labrincha (2013) apuntan en esta dirección, señalando la importancia del uso de los materiales y su eficiencia en términos de desarrollo sostenible. Investigaciones recientes indican que el uso de polímeros naturales, a partir de la implementación de algas marinas (Susilorini, Dewi & Wibowo, 2005), reduce el impacto ambiental y su comportamiento estructural es óptimo.

En este sentido, existen dos alternativas que reducen impactos ambientales. La primera, la utilización de materiales reciclados para producir nuevos materiales, como

por ejemplo el artículo de los autores Raut, Ralegaonka, Mandavgane (2011), donde analizan varias propiedades físico-mecánicas y térmicas de los ladrillos que incorporan diferentes materiales de desecho. La segunda, el uso de materiales locales, que puede reducir el traslado de materiales de construcción a través de largas distancias, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte de dichos materiales (Gupta, 2014).

Por otro lado, cabe mencionar que la nanotecnología es una gran promesa para los adelantos en la industria de la construcción (Spitzmiller, Mahendra & Damoiseaux, 2013). Se ha encontrado que los nanomateriales se utilizan en una variedad de aplicaciones eco-eficientes, incluyendo la mejora de las propiedades mecánicas, el control de la luz interior, la recolección de energía renovable y una avanzada durabilidad. Sin embargo, los aspectos de seguridad a largo plazo de estos nuevos materiales son poco conocidos. Afortunadamente, la aplicación de alto rendimiento en metodologías *in vitro* permite una visión que se puede obtener en el subyacente paradigma de nanotoxicidad que, a su vez, permita una comprensión de las nanopropiedades, que causan los efectos tóxicos en un nanomaterial dado, informando así sobre las características de diseño de seguridad, lo que permite el empleo seguro de esta poderosa tecnología.

Entre la lista de materiales aplicados a la construcción, existen unos materiales de especial interés por su gran potencialidad, que son los llamados materiales con cambio de fase. Se ha encontrado un artículo de revisión que pone al día el estado del arte de estos materiales. Este trabajo tiene como objetivo explorar cómo y dónde se utilizan pasivamente los materiales de cambio de fase (PCMs), con el calor latente de almacenamiento de energía térmica en

sistemas (LHTES), y presentar una visión general de cómo estas soluciones constructivas están relacionadas con el rendimiento energético del edificio.

Los diferentes tipos de PCM, y los criterios principales que rigen su selección, son revisados, así como los principales métodos para medir propiedades térmicas PCMs y las técnicas para incorporar PCM en elementos de construcción. Las modelizaciones numéricas de la transferencia de calor se discuten con técnicas mejoradas de cambio de fase y de transferencia de calor, seguido de una revisión de varios sistemas LHTES pasivos con PCM. Se revisaron los estudios sobre la simulación dinámica de la energía en los edificios (DSEB) que incorporan PCM. Principalmente, los estudios apoyados por certificaciones como Energy-Plus, ESP-r y herramientas de *software* TRNSYS. Se discuten las evaluaciones de los ciclos de vida, tanto ambientales como económicos. Finalmente, esta revisión muestra que las soluciones constructivas pasivas con PCM ofrecen el potencial de reducir el consumo de energía para calefacción y refrigeración, debido a la reducción de la carga/desplazamiento, y para aumentar el confort térmico interior, debido a la reducidas fluctuaciones de la temperatura interior (Soares, Costa, Gaspar y Santos, 2013).

Análisis de ciclo de vida

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) permite evaluar los impactos ambientales generados en todo el proceso de conformación de un material, desde la fase de extracción de materias primas hasta la disposición final de los desechos en su ciclo final. Los autores Zabalza, Valero & Aranda-Usón (2011), en su estudio, proponen un análisis comparativo entre los materiales de

construcción más utilizados con algunos eco-materiales. El estudio demuestra que el impacto de los productos de construcción se puede reducir mediante la utilización de mejores técnicas disponibles y la innovación ecológica en las plantas de producción. En esta misma línea de investigación (Franzoni, 2011), se utiliza el ACV como herramienta clave en el logro de la meta de los “edificios sostenibles”, que se debe llevar a cabo en la etapa inicial del proceso de diseño.

Según los autores Asdrubali, Baldassarri & Fthenakis (2013), el análisis de ciclo de vida (ACV) no se ha usado todavía ampliamente como herramienta de diseño ecológico entre los practicantes del sector de la construcción. En sus investigaciones realizadas a edificaciones en Italia, encontraron que, al aplicar esta metodología, la fase de operación tiene la mayor contribución al impacto ambiental total, entre un 77% y un 85%, mientras que el impacto de los rangos de la fase de construcción fue aproximadamente de un 14% a un 21%. Se entiende así por qué se aplica en la práctica esta metodología, especialmente en aquellos edificios cuyo impacto durante la fase de construcción debe ser comprobado cuidadosamente, como es el ejemplo de los Edificios de Cero Emisiones.

Las evaluaciones del impacto que generan los materiales se han estudiado con rigor en Estados Unidos (Lin, Levan & Dossick, 2012) y Europa, con grandes avances en lo que se refiere al establecimiento de categorías de impacto en todas las fases del ciclo de vida, en especial las que conciernen a la energía incorporada en los procesos de producción y transporte. La investigación realizada por Gustavsson, Joelsson & Sathre (2010) apunta a establecer los beneficios que tiene la metodología, en cuanto al uso de energía primaria en la totalidad de las cadenas

del sistema de energía y los flujos de carbono. Dentro del estudio se realiza un seguimiento riguroso, incluyendo emisiones de combustibles fósiles, las reservas de carbono en materiales de construcción y, como principal aporte, proponen disminuir las emisiones de combustibles fósiles implementando biocombustibles.

Uno de los retos que plantea la adaptabilidad al cambio climático es el adecuado manejo y la selección de los materiales. Los autores Tidblad *et ál.* (2012), en su investigación, analizan la durabilidad de los materiales frente a las cambiantes condiciones ambientales, en especial la contaminación atmosférica. En el mismo contexto, Nijland, Adan, van Hees y van Etten (2009) señalan cuatro escenarios de cambio climático desarrollados por la Royal Netherlands Meteorological Institute: el cambio de los parámetros climáticos, la temperatura más alta, la cantidad y la intensidad de las precipitaciones y el régimen de vientos.

Finalmente, varias de las publicaciones revisadas señalan que la construcción sostenible, basada en el análisis de ciclo de vida, tiene que ver con la mejora de los indicadores sociales, económicos y ambientales de la sostenibilidad (Ortiz, Castells & Sonnemann, 2010). Mediante la aplicación de Acv es posible optimizar estos aspectos, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos de materiales de construcción.

El paradigma de la edificación sostenible surgió para mitigar estos efectos y mejorar el edificio durante el proceso de construcción (Castro-Lacouture, Sefair, Flórez & Medaglia, 2009). Este cambio de paradigma debe traer beneficios significativos en el ámbito ambiental, económico y social.

Para finalizar, esta revisión ofrece un panorama de oportunidades para el sector de la construcción, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: 1) los riesgos asociados a la construcción de edificaciones frente al cambio climático, y 2) las estrategias para mitigar los riesgos en edificios existentes. Factores como la eficiencia energética y la construcción de un hábitat urbano resiliente son solo algunos ejemplos de acciones de mejora para adaptarse al cambio climático. Estos factores juegan un papel fundamental en la creación de resiliencia en el hábitat urbano. Sin embargo, no está tan claro qué papel juegan variables como, por ejemplo, la diversidad cultural en la capacidad de recuperación de los edificios y de los sistemas urbanos.

En este sentido, se observa que lo más viable es proponer acciones que generen una óptima interacción entre la densidad urbana y el cambio climático. Y se reconoce que en todo momento se presenta un reconocimiento de que el cambio de las densidades de población en centros urbanos se verá afectado por el cambio ambiental global. Por otro lado, se identifica que el concepto de resiliencia es una variable importante para evaluar la arquitectura y la capacidad de recuperación de la infraestructura urbana. Con esta variable se pueden determinar: 1) las condiciones en las cuales la arquitectura y la infraestructura urbana pueden ser definidas y medidas por la resiliencia, 2) el diseño basado en la evaluación de desempeño de los edificios sostenibles con gran capacidad resiliente, puede ofrecer alternativas innovadoras para la recuperación del hábitat urbano.

Otra variable importante de la resiliencia es el problema de la reutilización adaptativa de las edificaciones existentes, en donde se presenta la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación sostenible para este tipo de

construcciones, con el fin de que respondan, de manera óptima, a los cambios climáticos. Así, pues, el tema de la resiliencia en el área de la construcción se ha convertido en un tema decisivo, ya que, según lo expuesto en la revisión, la capacidad de resiliencia de las edificaciones permite una fácil construcción y ser viable económicamente en el mercado de la construcción.

En cuanto al tema de la eficiencia energética en las edificaciones, llama la atención las actuaciones para identificar los parámetros influyentes, con base en la reducción del consumo de energía durante el proceso de construcción. Las normativas vigentes a nivel internacional exigen altos niveles de aislamiento en la cubierta. La demanda de edificios sostenibles es cada vez más importante en este sector. Entonces, se entendería que la evaluación ambiental de los edificios y el hábitat urbano han ganado importancia sustancial en la industria de la construcción. Analizando lo que está ocurriendo en Colombia, se evidencia que las actividades de construcción son elementos que aumentan el cambio climático en el país. Por estas razones, se han implementado esfuerzos para minimizar el impacto ambiental causado por los proyectos de construcción durante la última década.

La revisión evidencia una gran variedad de resultados a nivel regional y local sobre la apropiación de estos conceptos en el país. Se observa que existe una presión del proceso de globalización en el sector de la construcción, junto con la necesidad de las grandes constructoras del país de entrar en el mercado internacional, esto ha hecho que los estándares de sostenibilidad, eficiencia energética y resiliencia se implementen de manera significativa en el país.

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) permite evaluar los impactos ambientales generados en todo

el proceso de construcción de la edificación. Según la revisión, se observa que la metodología más viable para desarrollar un buen análisis de ciclo de vida es realizar un comparativo entre los materiales de construcción más utilizados y el impacto que pueden generar en la construcción, con ello se pueden implementar mejores técnicas y estrategias en el hábitat urbano. En este contexto, la edificación sostenible orientada hacia la resiliencia es una buena opción para la construcción de un óptimo territorio resiliente, y para mitigar los impactos que se producen en dicho sistema.

Podemos concluir que existe una clara relación entre los conceptos de diseño de edificación resiliente, eficiencia energética, materiales y análisis de ciclo de vida. Para que una edificación pueda llegar a ser resiliente, primero tiene que ser sostenible y eficiente energéticamente. Por tanto, el diseño de edificaciones orientadas a la resiliencia es la mejor opción para la construcción de una buena habitabilidad, que permita una óptima sostenibilidad dentro de un territorio urbano y que, a su vez, garantice la habitabilidad de la especie frente al cambio climático.

El resultado de esta investigación fue un piloto de modelo de simulación estocástica simple, a partir de la construcción de un marco conceptual y generando una metodología de evaluación, con el propósito de identificar el comportamiento de lo que se ha denominado, en esta investigación, Territorios Resilientes Eficientes (TRE), capaces de adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, uno de los retos para alcanzar la verdadera sostenibilidad en la ciudad.

Para ello, se realizó un experimento exploratorio a través de una simulación. El objetivo de este experimento no era validar datos de la realidad, como se hace usualmente,

sino, por el contrario, construir, a través de un modelo experimental, una reflexión teórica del proceso de resiliencia, para luego, a partir de estas experiencias, construir herramientas que puedan medir y evaluar las variables de estudio en contextos reales.

Por tanto, se desarrolló la siguiente metodología:

- En primer lugar, se realizó una simulación a partir de observaciones de áreas urbanas. Se realizaron también cálculos mediante la introducción de números aleatorios en una matriz de diferentes variables propuestas. Estos números aleatorios imitaban las observaciones realizadas.
- En segundo lugar, se realizaron varias iteraciones para constatar la validez de la hipótesis propuesta, con las cuales se realizó un muestreo estadístico que sirvió para realizar el análisis de resultados.
- Finalmente, se calcularon el efecto principal, el efecto secundario y el efecto simple de interacción entre las variables.

El modelo muestra que un alto impacto ambiental afecta la habitabilidad de un hábitat urbano en un 60%, lo que demuestra una fuerte relación entre las variables cuando se enfrentan a sucesos imprevistos. Es decir, la capacidad de resiliencia de un hábitat urbano depende de varias acciones que responden al sistema afectado. Por último, el modelo mostró que las variables de eficiencia energética, en comparación con el elemento resiliencia del material, afectan el confort de un hábitat urbano. Esto significa que habrá una alta necesidad de resiliencia, ya que el hábitat urbano puede no tener la capacidad de responder a los eventos inesperados.

De lo anterior se concluyó que las futuras aplicación de este modelo básico estarán orientadas al desarrollo de nuevos instrumentos, para evaluar la capacidad de resiliencia en un territorio. Además, estas herramientas podrían tener la capacidad de identificar las necesidades de las diferentes áreas urbanas, por medio del estudio de diferentes variables bajo simulación, como por ejemplo cálculos bioclimáticos y de flexibilidad territorial, que permitirán la evaluación del impacto en el ambiente. Asimismo, el modelo suministra los parámetros para que se diseñen Territorios Resilientes Eficientes (TRE), relacionando las variables de adaptación al cambio climático para determinar el grado de resiliencia de un territorio.

Para finalizar, el libro está dividido en tres capítulos. En la primera parte se describe brevemente el tema de Bogotá frente al cambio climático. En este aparte se analizará el impacto que tiene este fenómeno en la ciudad, para luego estudiar el comportamiento de los efectos que se presentan en su hábitat urbano. A continuación, se muestran los principios de urbanismo y arquitectura sostenible que han sido implementados por las instituciones públicas de la ciudad, en respuesta al cambio climático. Finalmente, se expondrán los argumentos por los cuales es necesario construir territorios resilientes y eficientes en Bogotá.

La segunda parte analiza tres conceptos: habitabilidad, eficiencia y resiliencia. Para definir estos tres conceptos se examinan los efectos del cambio climático, derivados del impacto ambiental en el sector de la construcción en Bogotá. Luego, se estudia la eficiencia en la utilización de procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad de las edificaciones en Bogotá.

A continuación, se describen los recursos para mejorar la habitabilidad frente al cambio climático en Bogotá. Y, por último, se define el concepto de resiliencia como una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá.

La tercera parte desarrolla la propuesta para el diseño de un modelo orientado a Territorios Resilientes Eficientes (TRE) en Bogotá. En primer lugar, se describen los conceptos base, a partir de analizar el modelo de administración de ambientes resilientes. Luego se explica el porqué de la necesidad de garantizar la sostenibilidad, a partir del concepto de resiliencia. A continuación, se expone el concepto de eficiencia territorial a partir del factor de resiliencia, para terminar el capítulo con el desarrollo del modelo propuesto y su relación con el concepto de Territorios Resilientes Eficientes (TRE). Finalmente, se presentan las conclusiones y las referencias del documento.



Bogotá frente al cambio climático

Rolando Arturo
Cubillos-González

Francisco Javier
Novegil-González-Anleo

| | |
|--|----|
| Introducción 1..... | 30 |
| El impacto del cambio climático en Bogotá..... | 31 |
| ¿Cómo afecta el cambio climático al hábitat urbano de Bogotá? | 34 |
| Principios de urbanismo y arquitectura sostenible en respuesta al cambio climático en Bogotá..... | 35 |
| La necesidad de construir territorios resilientes y eficientes en Bogotá | 37 |



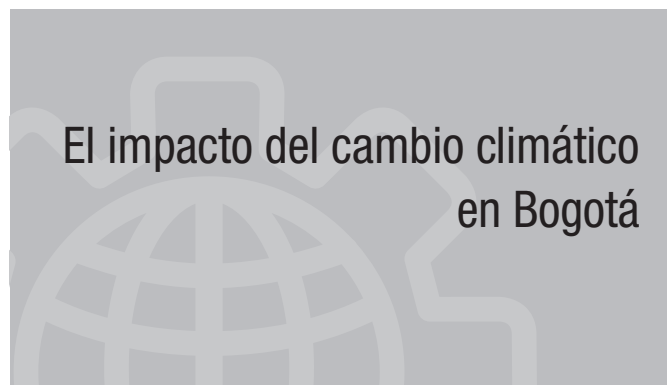
Introducción 1

El cambio climático es uno de los fenómenos que afecta de manera directa al hombre. Por esta razón, Bogotá ya se enfrenta a una serie de riesgos relacionados con el clima, los cuales son similares a otros que ya se han manifestado, de manera reiterativa, en otros lugares del mundo, tales como las olas de calor y episodios de contaminación atmosférica e inundaciones (Wilby, 2007). A pesar de que existen varios estudios sobre el tema, en la actualidad no se han medido las consecuencias del crecimiento urbano, que evidencian que las zonas edificadas ejercen una influencia considerable sobre el clima local y el medio ambiente.

El objetivo de este capítulo es analizar las características de los impactos producidos por el cambio climático en la habitabilidad de las edificaciones y el hábitat urbano de la ciudad de Bogotá. En este orden de ideas, el hábitat construido tiene un impacto sustancial en la economía, la sociedad y el medio ambiente de la ciudad. Se entendería que la evaluación de los impactos producidos por las edificaciones, en este contexto, sería de gran importancia para la industria de la construcción, sus habitantes y el distrito, dando respuesta a la creciente demanda de sostenibilidad y resiliencia que requiere la ciudad.

Además, este capítulo centrará la atención en fijar antecedentes y señalar las condiciones y retos que tiene la construcción, para adaptarse a los efectos del cambio climático en Bogotá. También se buscan identificar los procesos constructivos que generan alto impacto ambiental a nivel arquitectónico y urbano. Se analizará el desbordante crecimiento urbano de la ciudad y cómo esta utiliza los recursos naturales, para poder resolver la pregunta ¿cómo afecta el cambio climático al hábitat urbano de Bogotá? Este capítulo se ha configurado como una referencia para aquellos que desean aprender los aspectos más importantes sobre la resiliencia y la sostenibilidad.

Este capítulo está dividido en cuatro partes. En la primera parte se describe brevemente el impacto del cambio climático en Bogotá. La segunda parte da respuesta a la pregunta ¿cómo afecta el cambio climático a Bogotá? La tercera resume cuáles serían los principios de urbanismo y arquitectura sostenible, en respuesta al cambio climático en Bogotá. Finalmente, la cuarta parte está referida a la descripción de la necesidad de construir territorios y edificaciones resilientes en Bogotá.



El cambio climático es la variación del clima causada directa o indirectamente por la actividad humana (Costa & Mora, 2010). Se ha determinado que el cambio climático ha hecho vulnerables a la acción del hombre diferentes áreas de Colombia (Costa & Mora, 2010). Si no se controlan los actuales impactos ambientales, un gran número de edificaciones, en diferentes áreas del país, y particularmente en Bogotá, se verán afectadas por eventos naturales que serán intensos por este fenómeno, lo que traerá un mayor deterioro ambiental. Una consecuencia directa es el cambio en las condiciones de habitabilidad de las edificaciones y el hábitat de la ciudad.

Para el gobierno nacional, regional y local, el cambio climático es una prioridad, porque Colombia es uno de los países donde este suceso puede causar mayores impactos y amenazas al ambiente y al hábitat humano. Bogotá es altamente vulnerable al cambio climático. Según estudios realizados por entidades gubernamentales, de carácter nacional e internacional, el territorio bogotano es vulnerable a los cambios extremos en los patrones de precipitación y temperatura (Ideam, 2014).

Otros estudios, realizados por el Ideam y el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (García *et ál.*, 2013), afirman que el comportamiento del clima, a futuro, en la capital de Cundinamarca, Bogotá, tenderá hacia los siguientes impactos ambientales. En primer lugar, se presentarán cambios en la temperatura: entre 3°C y 4°C. En segundo lugar, se manifestará una transición del clima semi-húmedo al semi-árido. En tercer lugar, disminuirán las precipitaciones entre un 10 % y un 30%. Finalmente, se presentarán, con mayor frecuencia e intensidad, eventos extremos de carácter

lluvioso y seco. En el caso de Bogotá, ya se observan algunos de estos impactos.

En este mismo orden de ideas, el estudio de estas instituciones plantea además que se observa hacia el futuro que el clima de Bogotá tenderá a estar afectado por los siguientes tres microclimas en el área metropolitana de Bogotá (García *et ál.*, 2013): hacia el norte y nor-oriental el clima será semi-húmedo; hacia el nor-occidente el clima será semiárido y hacia el sur el clima será super-húmedo. Lo anterior significa un gran aumento de la variabilidad climática a futuro, por el cambio del tipo de clima en la ciudad. ¿Qué efectos tendrán estos cambios en el hábitat urbano de Bogotá?

Ahora bien, en Bogotá hoy existe un cambio climático extremo. Efectivamente, se observa que, a causa del uso extensivo de grandes superficies urbanizadas en Bogotá, se están presentando los siguientes impactos climáticos: 1) aumento del efecto de isla de calor a nivel urbano, 2) incremento de los eventos de precipitaciones extremas, 3) incremento de las inundaciones en áreas desprotegidas, y 4) incremento de la temperatura en las diferentes zonas urbanas. Asimismo, la sostenibilidad de la ciudad se ve afectada de la siguiente manera: 1) se incrementa la vulnerabilidad a los eventos de extremo calor en la ciudad, 2) se disminuye la efectividad de la ventilación natural en las edificaciones, 3) incremento de la demanda de consumo de agua y energía, 4) incremento en la intensidad y frecuencia de incendios forestales en los cerros orientales de la ciudad (ver figura 1).

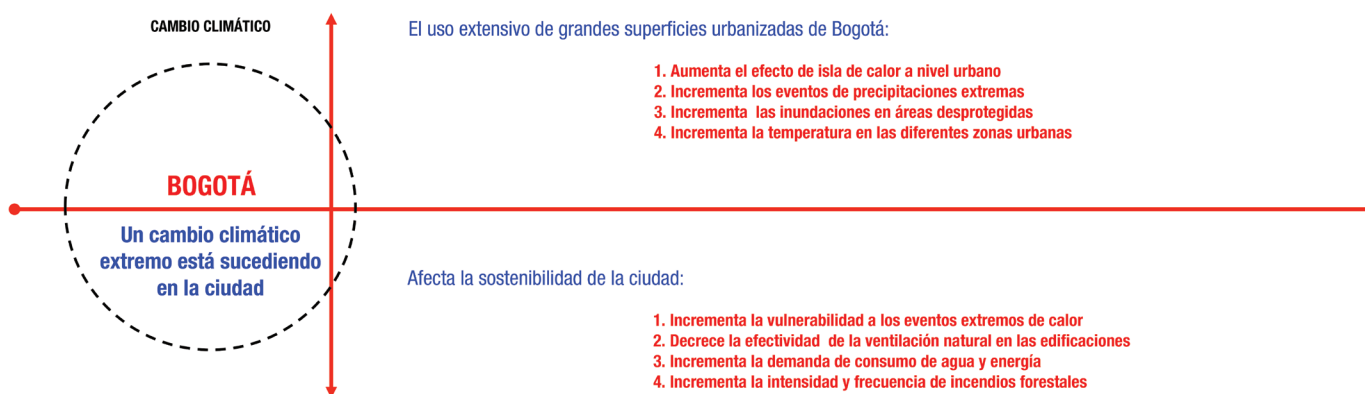


Figura 1. Causas y consecuencias del cambio climático en Bogotá.

Ante este panorama, podemos afirmar que Bogotá requiere construir un hábitat urbano sostenible. En este contexto, el concepto de resiliencia es el nuevo factor, ya que en las actuales condiciones climáticas de la ciudad se necesita una alta capacidad de resiliencia para construir un adecuado ambiente sostenible. En resumen, es necesario garantizar un proceso que le permita a la ciudad mantenerse en el tiempo, generando una rápida capacidad de adaptación al cambio climático para construir edificios y ciudades resilientes. Por lo anterior, se busca que el sector de la construcción, en la ciudad, proteja el ambiente para que, a futuro, las personas puedan cambiar el modelo de consumo energético y promover la sostenibilidad y la resiliencia en las edificaciones (ver figura 2).

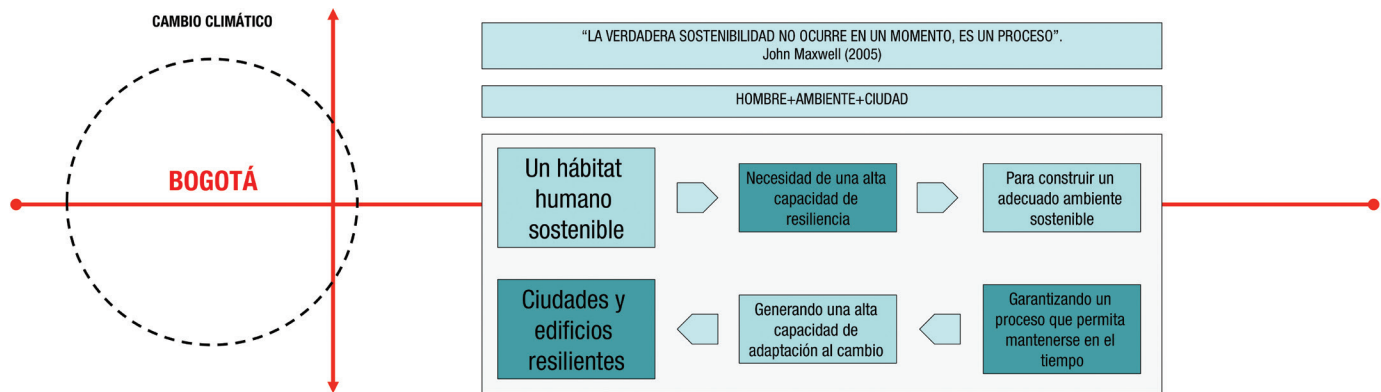


Figura 2. Causas y consecuencias del cambio climático en Bogotá.

¿Cómo afecta el cambio climático al hábitat urbano de Bogotá?

El cambio climático afecta a Bogotá de dos formas: la primera, al hacer la ciudad vulnerable en distintas zonas y la segunda, derivada de la primera, generando una necesidad de adaptación que va más allá de solo una respuesta de mitigación de dicha vulnerabilidad. Respecto a este tema, por parte del sector de la construcción se han implementado acciones tímidas para responder, de manera contundente, a las nuevas condiciones ambientales. Por esta razón, en la actualidad el concepto de resiliencia se ha convertido en un elemento relevante para el diseño y la construcción de edificaciones en Bogotá (figura 3).

Por ejemplo, como afirma Jan Gehl en una entrevista (Dalsgaard, 2012; Gehl & Svarre, 2013): “Nosotros podemos diseñar una ciudad llena de edificios sostenibles, pero no significa que la ciudad sea sostenible” (RIBA, 2009). Lo que quiere decir que Bogotá necesita una respuesta más orientada a la adaptación de su territorio.

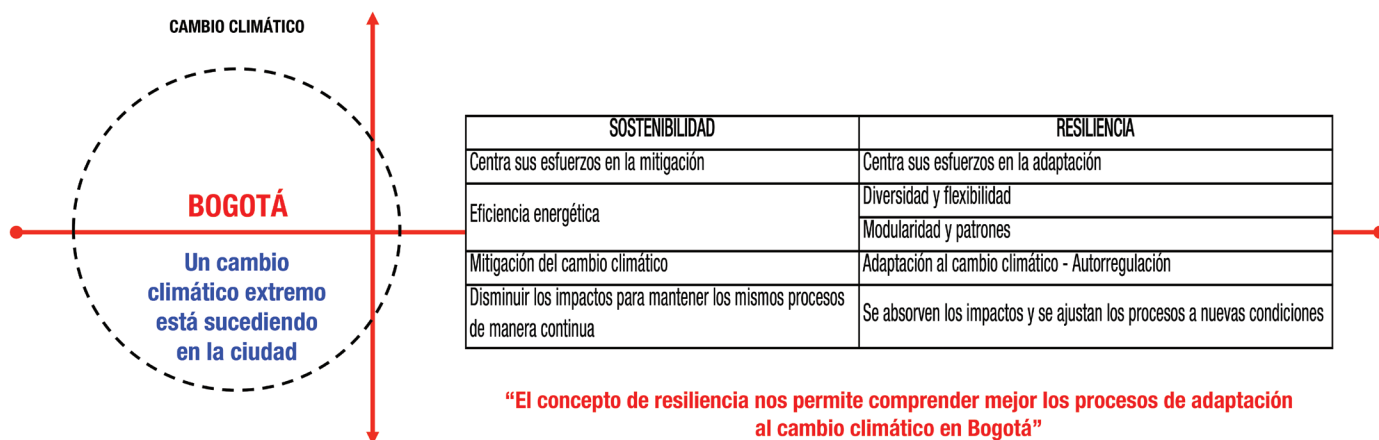


Figura 3. Líneas de pensamiento en respuesta al cambio climático.

Principios de urbanismo y arquitectura sostenible en respuesta al cambio climático en Bogotá

"Nosotros podemos diseñar una ciudad llena de edificios sostenibles, pero eso no significa que la ciudad sea sostenible".

Jan Gehl, 2010

El fenómeno de urbanización en Colombia ha pasado de ciudades en expansión a ciudades compactas, lo que convierte a Colombia en un país urbano. Se espera, para el año 2050, que Colombia cuente con una cifra alrededor de los 54 millones de personas, de las cuales el 85% vivirá en ciudades (Departamento Nacional de Planeación, 2012). En los últimos años, las ciudades colombianas se han convertido en polos de desarrollo y en centros de atracción de la población. Se identifica que varias de ellas reflejan un mayor crecimiento del PIB. Como consecuencia de ello, las políticas del gobierno colombiano están orientadas a la construcción de un sistema de ciudades dentro de su territorio (Barco, 2013). Con ello se busca generar una mayor concentración urbana, con menores niveles de pobreza, es decir, generar ciudades inclusivas. Por estas razones, hoy las ciudades colombianas no están exentas de varios problemas a causa de su crecimiento. Es importante destacar las necesidades que tienen. Estas son algunas de ellas:

- Generar mercados regionales.
- Diversificación de actividades dentro de la ciudad.
- Ampliación de la oferta educativa.
- Interrelacionarse con el sector rural.
- Nuevas infraestructuras, desarrollo de espacio público y equipamientos.
- Relacionar, de manera eficiente, la movilidad, el mercado laboral y la productividad.

Aunque hoy en Colombia se está implementando una política nacional de urbanismo sostenible, esta no define cómo serían las ciudades desde la identificación de patrones urbano sostenibles (Cubillos, 2006), lo que hace necesario proponer criterios para su adecuado diseño desde el concepto de sostenibilidad.

En este contexto, Colombia tiene que enfrentar tres desafíos importantes, como son: el cambio climático, la explosión demográfica y el impacto ambiental. Estos desafíos requieren con urgencia la aplicación de principios de urbanismo sostenible en el país.

Diseñar ciudades eficientes es esencial para el desarrollo de Colombia en los próximos años (Samad, Panman, Rodríguez & Lozano-Gracia, 2015). Esta será la base para que el país genere un proceso de urbanización inclusivo, que conduzca a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las ciudades colombianas. Entonces, es importante preguntarse: en el caso de Bogotá, ¿cuál es el papel del diseño sostenible en el desarrollo de la ciudad?

A partir del estudio de las relaciones de los tres pilares de la sostenibilidad y lo expuesto anteriormente, se presenta a continuación un primer esquema general de estrategias de diseño sostenible para Bogotá. Cabe anotar que algunas de estas estrategias ya están siendo aplicadas en la ciudad.

Estrategias de diseño urbano sostenible para la dimensión ambiental:

- Proponer el desarrollo de una urbanización de bajo consumo de CO₂.
- Buscar un equilibrio entre el impacto y el uso del ambiente en la ciudad.

- Desarrollar estrategias de diseño pasivo y activo para la construcción, renovación y reciclaje de las edificaciones de la ciudad.
- Proponer el menor número de áreas de urbanización versus un máximo aprovechamiento del uso de las áreas construidas dentro de la ciudad.

Estrategias de diseño urbano sostenible para la dimensión social:

- Proponer respuestas a las necesidades de los ciudadanos, a partir de patrones urbanos sostenibles.
- Gestión sostenible del uso del suelo.
- Equilibrio urbano entre las actividades de trabajo, salud, cultura y educación, para garantizar buenos indicadores de calidad de vida.
- Procurar un desarrollo armónico entre la ciudad antigua y la ciudad moderna.

Estrategias de diseño urbano sostenible para la dimensión económica:

- Integración del sector público y privado en modelos de economía verde.
- Estrategias de ahorro y consumo responsable de recursos urbanos.
- Orientación de la industria a una intervención del ambiente responsable.

A continuación, se presenta un esquema de un modelo base para la implementación de las estrategias de diseño urbano sostenible.

La necesidad de construir territorios resilientes y eficientes en Bogotá

En este punto, es importante definir cuál será el comportamiento futuro del territorio bogotano frente al cambio climático. A continuación se expondrán brevemente dos conceptos: el territorio resiliente y el territorio eficiente. Es importante anotar que se requiere pasar del concepto de territorio resiliente hacia uno más complejo: el concepto de territorio eficiente.

Desde la visión sostenible, un territorio resiliente es capaz de establecer un equilibrio con el ambiente. Para entender este concepto, se han identificado las siguientes variables (Cortés & Cubillos, 2014):

- Habitabilidad: es la capacidad que tiene un territorio para garantizar las condiciones mínimas de existencia de los seres vivos (Cubillos & Rodríguez, 2013).
- Flexibilidad: es la capacidad de adaptabilidad de un territorio a diferentes condiciones ambientales (Cubillos, 2006).
- Biodiversidad: es la capacidad que tiene un territorio para soportar diversas formas de vida.
- Biocapacidad: es la capacidad que tiene un territorio para renovarse así mismo (Ewing, Poblete, Chen & Caycedo, 2010).
- Una de estas soluciones implica el concepto de territorio eficiente. Actualmente, esto se define como un espacio que tiene múltiples dimensiones, como son la dimensión ambiental, la dimensión económica y la dimensión social, con una capacidad de adaptación a un hábitat urbano (Altomonte, 2008; Hunt, Rogers & Jefferson, 2013; Trebilcock, Ford & Wilson, 2006). Sin embargo, la definición propuesta es demasiado general. Debería, por ejemplo, explicar

cómo el entorno urbano puede ser más eficiente y adaptable, a fin de abordar, de manera sostenible, el cambio climático (Costa, 2007; Eisenack *et ál.*, 2014). La necesidad de resiliencia en las ciudades colombianas, y en particular en la ciudad de Bogotá, debe ser implementada de manera apropiada en las políticas gubernamentales.

Por otro lado, toman importancia dos conceptos: la capacidad de recuperación y la eficiencia energética de los edificios (EEB). De acuerdo con el Centro de Resiliencia de Estocolmo (Stockholm Resilience Centre, 2014), la resiliencia es la capacidad de un sistema para hacer frente y adaptarse al cambio. El tipo de resiliencia del que se habla en este documento es la resiliencia ecológica, que se centra en la persistencia, el cambio y la imprevisibilidad, y mide la magnitud de la perturbación que puede ser absorbida antes de que el sistema cambie su estructura (Schulze, 1996).

La EEB (Mehdipoor *et ál.*, 2013; Hannus, 2009) tiene como objetivo reducir el consumo de energía manteniendo los mismos requisitos de energía. Por lo tanto, es necesario identificar la capacidad de recuperación y la eficiencia energética de los edificios en las ciudades (Mlecnik, 2012). Así que, ¿cuál es exactamente la relación entre la capacidad de resiliencia y el consumo energético de un territorio? Para dar una respuesta, los conceptos de resiliencia, eficiencia energética y habitabilidad se analizaron, y se encontró una fuerte interrelación entre ellos (ver figura 4).

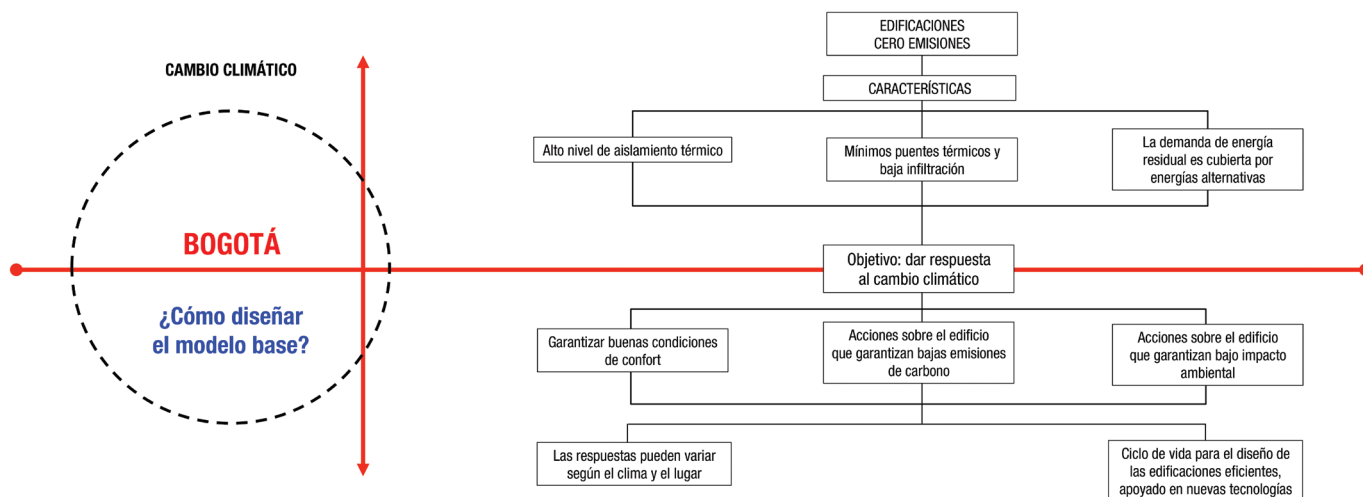


Figura 4. Aplicación de estrategias de sostenibilidad en Bogotá a partir de un modelo base.

Es necesario proponer un modelo que permita el desarrollo de nuevas herramientas, para evaluar la habitabilidad de los edificios frente al cambio climático. El modelo también puede tener la capacidad de identificar las necesidades de los diferentes usuarios de un edificio, por medio de las variables de modelado y simulación.

Por ejemplo, las variables de cálculo bioclimático y la flexibilidad de vivienda, que permiten la evaluación de los edificios y su impacto en el medio ambiente. La figura 5 muestra, en este sentido, la respuesta por medio de estrategias al cambio climático. Estas estrategias pueden ser una guía para crear un diseño de modelo de edificación resiliente.

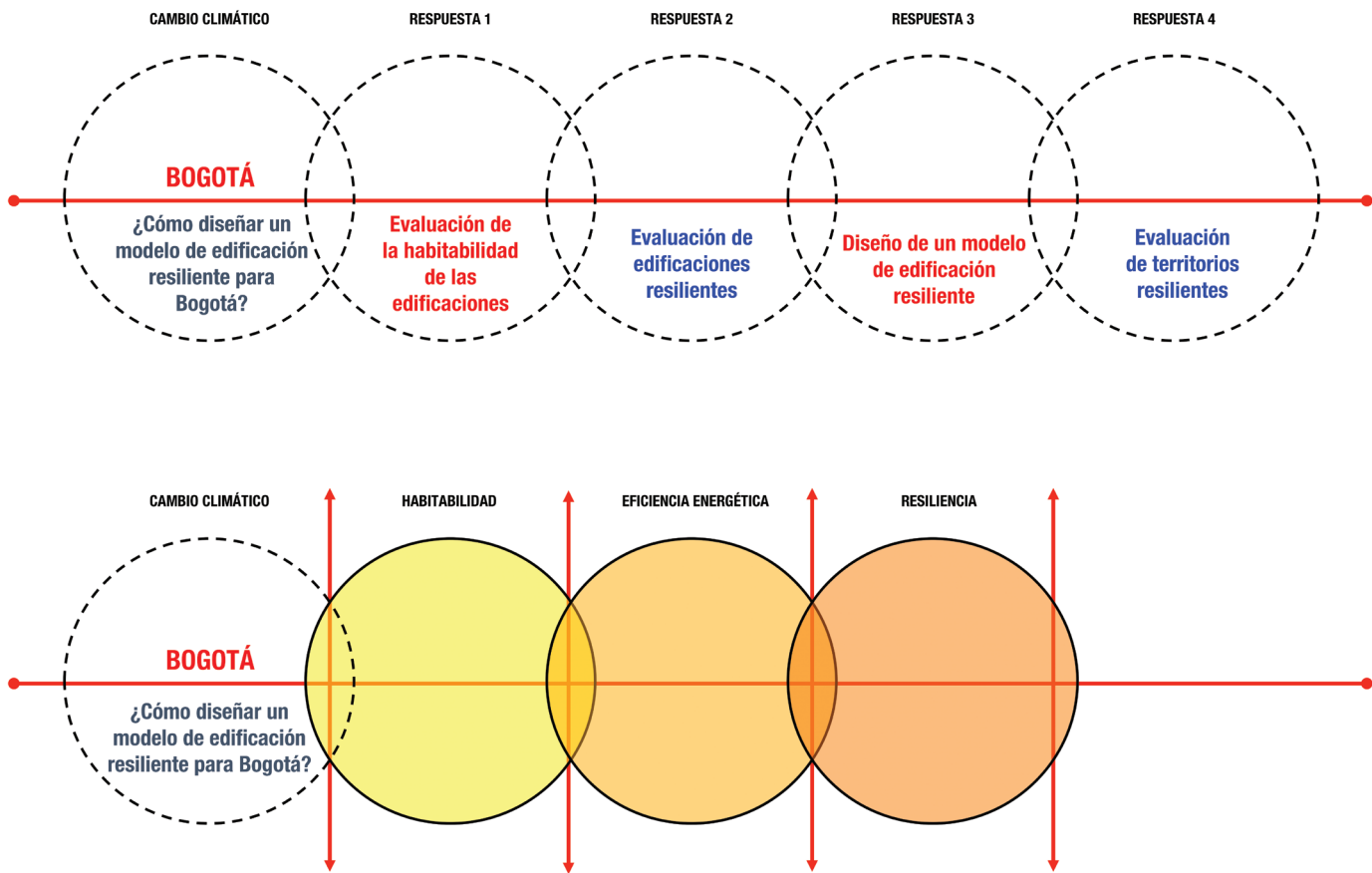


Figura 5. Cómo diseñar un modelo de territorio resiliente y eficiente.
Fuente: Cubillos (2015).

En la figura 6 se expone el diseño de un hábitat urbano resiliente. Este modelo cruza diferentes elementos, necesarios para el diseño de una edificación y un hábitat resiliente, tales como: la adaptación al cambio climático, la eficiencia energética externa y la eficiencia energética interna. Además, la misma figura muestra la intersección de estos elementos, los cuales permiten cuantificar e implementar un piloto de medición y eficiencia energética.

Esta cuantificación podría admitir la identificación del grado de resiliencia de una edificación y, a su vez, una posible respuesta al cambio climático. El siguiente capítulo nos hablará de la importancia de la habitabilidad, la eficiencia y la resiliencia para poder construir dicho piloto.

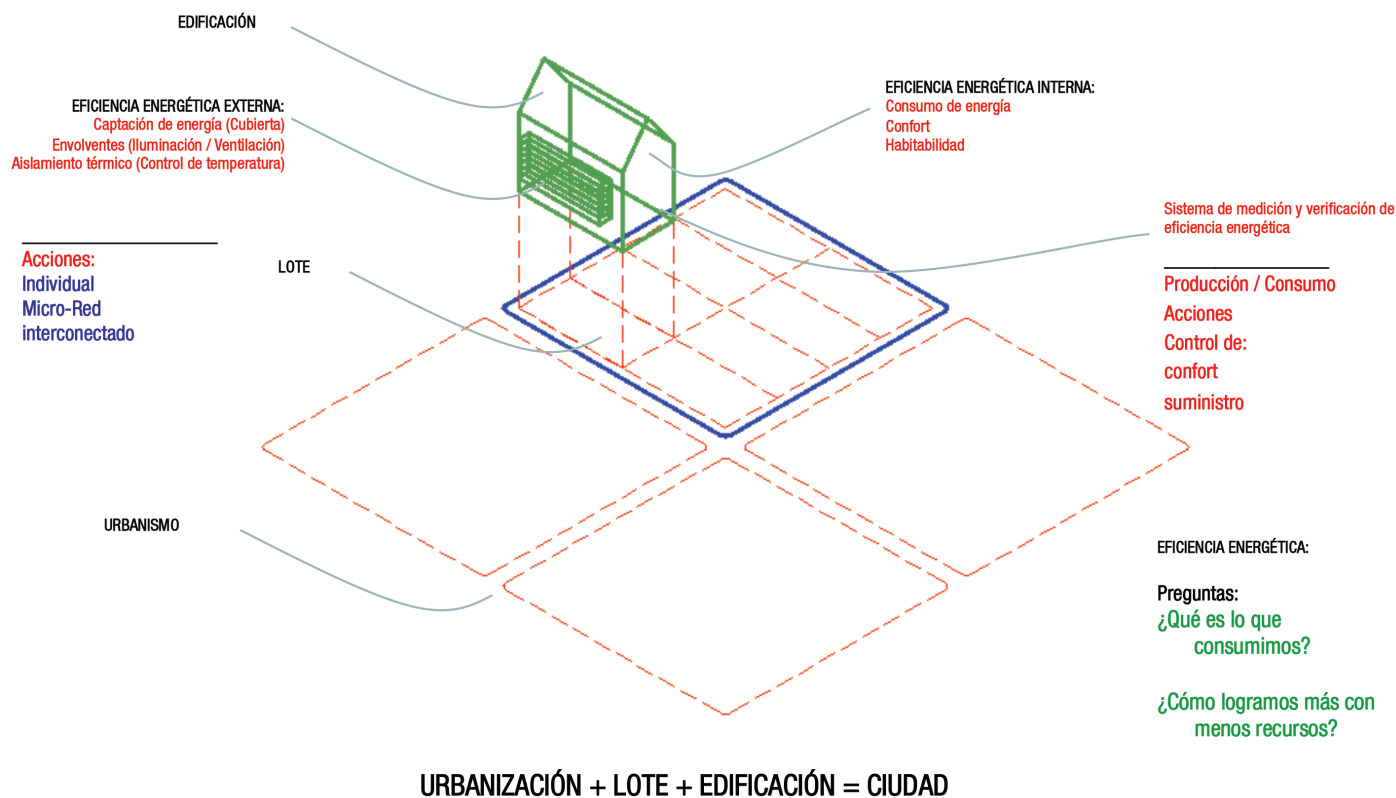


Figura 6. Homologación de las respuestas del edificio según el clima y el contexto.
Fuente: Cubillos (2015).

2

Habitabilidad, eficiencia y resiliencia

Rolando Arturo
Cubillos-González

Francisco Javier
Novegil-González-Anleo

Oscar Alfonso
Cortés-Cely

| | |
|---|----|
| Introducción 2 | 42 |
| Efectos del cambio climático derivados del impacto ambiental, del sector de la construcción en Bogotá | 43 |
| La utilización de procesos y materiales constructivos, que afectan la habitabilidad de las edificaciones dentro del hábitat urbano de Bogotá | 45 |
| Clasificación de materiales de construcción | 46 |
| Indicadores de impacto ambiental | 46 |
| Selección y ciclo de vida de materiales en la construcción | 47 |
| Etapas del ciclo de vida de los materiales | 48 |
| Evaluación de impacto ambiental | 50 |
| Metodologías de evaluación de los materiales de estudio | 51 |
| Hacia la resiliencia y eficiencia de materiales para la arquitectura | 52 |
| Materiales resilientes | 52 |
| Métodos de ensayo para cuantificar las propiedades mecánicas | 55 |
| Cálculo de la resiliencia a partir de la curva esfuerzo vs deformación | 60 |
| Ensayo Charpy | 60 |
| Análisis de la superficie de fractura en función de la temperatura | 62 |
| Resiliencia: una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá | 64 |
| El concepto de habitabilidad | 65 |
| Flexibilidad | 65 |
| Los patrones sociales | 66 |
| Modelo de habitabilidad | 66 |
| Calidad de los edificios | 66 |
| Calidad de vida | 67 |
| Modelo de administración de ambientes resilientes | 68 |
| Tecnología resiliente | 68 |
| Patrones adaptativos al cambio climático | 69 |



Introducción 2

El propósito de este capítulo es describir, de manera más detallada, el comportamiento de los conceptos de habitabilidad, eficiencia y resiliencia aplicados a la ciudad de Bogotá, para relacionar el concepto de cambio climático con los conceptos anteriormente mencionados. Este capítulo está dividido en cuatro partes. En la primera parte se describen brevemente los efectos del cambio climático, derivados del impacto ambiental del sector de la construcción en Bogotá. La segunda parte da respuesta a la utilización de procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad de las edificaciones, dentro del hábitat urbano de Bogotá. La tercera expone cuáles serían los recursos para enfrentar, de una manera diferente, el mejoramiento de la habitabilidad frente al cambio climático en Bogotá. Finalmente, se concluye el capítulo con la descripción del concepto de resiliencia, como una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá.

Efectos del cambio climático derivados del impacto ambiental, del sector de la construcción en Bogotá

Según el reporte *Ciudades y cambio climático en Colombia* (García *et ál.*, 2013), se identificó que Colombia es un país mayoritariamente urbano, concentrando más del 70% de su población en las ciudades, especialmente en la Región Andina y, en segundo plano, en la Región Caribe, representando aproximadamente el 80% de la población urbana del país. El sistema urbano de las ciudades colombianas se encuentra caracterizado por la primacía de la ciudad capital, Bogotá, seguida de tres ciudades –Medellín, Cali y Barranquilla– con poblaciones entre 1 y 5 millones de habitantes. Además de 33 ciudades intermedias, con poblaciones entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes, y más de 1000 centros urbanos con menos de 100.000 habitantes.

Dentro de los hallazgos encontrados en el reporte, se destacan (García *et ál.*, 2013):

- La ola invernal de 2010-2011 fue un detonante importante para poner en la agenda el tema del cambio climático y el riesgo en las ciudades colombianas

- El apoyo técnico y financiero de entidades nacionales e internacionales, el cual ha contribuido a desarrollar acciones de cambio climático en las ciudades y al desarrollo de insumos para su gestión.
- La Ley 1523 de 2012 ayuda a fortalecer la autonomía de las entidades territoriales en el conocimiento, la mitigación y el manejo local de los riesgos climáticos, al adoptar una política nacional de gestión del riesgo de desastres. Aunque las ciudades cuentan con geografía y condiciones particulares, los riesgos climáticos que enfrentan son similares.
- Es importante que las ciudades implementen un enfoque de aprendizaje de política pública sobre el cambio climático.
- Hay vacíos importantes en las capacidades técnicas de las ciudades, para generar y procesar información climática y sobre riesgo, especialmente en términos prospectivos.
- Hay debilidades en procesos de inclusión y participación de las comunidades y la sociedad civil.

En el caso particular de Bogotá, el tema del cambio climático es reciente y necesariamente está ligado a los procesos de densificación y de planeamiento territorial. Efectivamente, el estudio resalta (García *et ál.*, 2013) que la articulación conceptual entre el cambio climático y el ordenamiento territorial es una necesidad que debe ahondarse desde la visión de la protección de la biodiversidad. El manejo integral de la biodiversidad debería tener una definición clara en el uso del suelo y los procesos de densificación.

Por ejemplo, a pesar de que el POT fue creado en el año 2000, este documento y sus revisiones posteriores, en los años 2003 y 2004, no comprendían el concepto de cambio climático dentro de su formulación, ya que el tema, en su época, no tenía la misma importancia que ahora se le da. Al respecto, la modificación extraordinaria realizada al POT de Bogotá en agosto de 2013 buscó incorporar un nuevo capítulo dedicado a la gestión de riesgos y al cambio climático, en concordancia con lo dispuesto en la Ley 1523 de 2012.

Igualmente, el énfasis del distrito alrededor del cambio climático se dirigió a reducir la exposición y la vulnerabilidad de la ciudad frente al fenómeno. Efectivamente, el artículo 94 de la Ley menciona la “resiliencia a los impactos adversos potenciales de los extremos climáticos” (Colombia, Ley 1523, 2012, art. 94). Asimismo, en el artículo 95 de dicha Ley se definieron los conceptos que articulan la gestión de riesgos y el cambio climático en Bogotá, como son: amenaza, vulnerabilidad, vulnerabilidad al cambio climático, riesgo público, cambio climático, resiliencia y territorios resilientes.

Dentro de este tema, hay que resaltar que los objetivos estaban orientados a la reducción de riesgos debidos a la inadecuada localización de la población, el incorrecto uso, diseño y construcción de edificaciones e infraestructuras, lo que origina una alta necesidad de resiliencia en la ciudad y convierte este concepto en un nuevo factor de análisis. Desde la perspectiva de la adaptación al cambio climático, la resiliencia aporta nuevas variables que apuntan a la eficiencia integral de la edificación. El análisis de este factor nos permite evaluar los riesgos y

el impacto que genera la arquitectura sobre la estructura urbana (Cortés & Cubillos, 2014).

Para ello, toma vital importancia el estudio de respuestas que permitan una adecuada solución a la necesidad de adaptación de las edificaciones al cambio climático en la ciudad de Bogotá. Por tanto, es conveniente tener en cuenta que dichas estrategias deben estar orientadas a la construcción de una ciudad resiliente, que admite el proceso de densificación originado por la demanda del crecimiento poblacional, sin que se afecte su capacidad de habitabilidad en los espacios edificatorios o los espacios públicos (Cubillos & Rodríguez, 2013).

En este aspecto, lo primordial es orientar el diseño de las nuevas edificaciones y la rehabilitación de las antiguas hacia el concepto de edificio resiliente, el cual debe responder al cambio climático por medio de estrategias resilientes y principios de sostenibilidad (Cubillos & Rodríguez, 2013). Por ejemplo, el desarrollo de las estrategias resilientes podría conducir al desarrollo de tecnologías que puedan mejorar la condición de confort térmico en los espacios, con un bajo impacto ambiental. Para ello, se hace necesario el estudio de los procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad de las edificaciones.

La utilización de procesos y materiales constructivos, que afectan la habitabilidad de las edificaciones dentro del hábitat urbano de Bogotá

Los procesos constructivos y el empleo de materiales de construcción varían en el contexto mundial con las nuevas dinámicas de expansión urbana, las transformaciones sociales y económicas y, principalmente, por el impacto que genera la industria de la construcción en los sistemas ambientales. Dicho impacto ha ido transformado los ecosistemas a medida que crece la ciudad, aumentando el uso de recursos no renovables y la demanda de energía y agua. En esta línea de crecimiento y expansión, las ciudades y sus habitantes se enfrentan a cambios de paradigma, donde la innovación, en términos de procesos de adaptación y mitigación al cambio climático, a la explosión demográfica y al uso de los recursos naturales para la construcción y la incorporación de nuevos materiales, permita la eficiencia y la gestión de los residuos para la construcción de un hábitat sostenible.

Las cargas ambientales, que están asociadas a los impactos generados por la industria de la construcción y su alto impacto, derivan del uso indiscriminado de recursos no renovables y la implementación de energías fósiles, principalmente de la obtención de productos derivados de la transformación de materias primas, el transporte, distribución y puesta en obra de los materiales que se emplean en la construcción de las edificaciones a escala global, regional y local.

Para centrar el análisis de los procesos y materiales constructivos que afectan la habitabilidad, y la calidad urbana y arquitectónica en Bogotá, se propone la implementación de la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), como herramienta de análisis, evaluación y validación de resultados del impacto ambiental, generado principalmente en tres categorías: 1) salud humana, 2) calidad del ecosistema y 3) recursos.

Tabla 1. Clasificación de materiales en el contexto local, regional y mundial.

| Clasificación de materiales de construcción | | | | |
|---|------------------------|-------------|----------------------|---------------------|
| | ICONTEC | México | EU | U.K. |
| A. | Concretos | Ferrosos | Metales y aleaciones | Metálicos |
| | Metales | | | |
| B. | Cerámicas y ladrillos | No ferrosos | Polímeros | Polímeros |
| | | | | |
| C. | Agregados (piedras) | Orgánicos | Polímeros | Cerámicos y vidrios |
| | No metales | Maderas | | Cerámicos |
| D. | Metales | Inorgánicos | Cerámicos | Compuestos |
| | | Vidrios | | Compuestos |
| E. | Maderas | | Nanociencia | |
| | | | | |
| F. | Vidrios | | Semiconductores | |
| | | | | |
| G. | Plásticos y sintéticos | | | |

Clasificación de materiales de construcción

El avance en la clasificación de materiales en el contexto nacional lo adelanta el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). Es el organismo encargado de la normalización, la certificación, la metrología y la gestión de la calidad en Colombia. La clasificación se establece a través de los materiales más empleados en la industria, y su aplicación y uso en la construcción (ver tabla 1).

Indicadores de impacto ambiental

El DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) establece algunos parámetros de indicadores de impacto ambiental, no vincula los materiales que emplea la industria de la construcción, las estadísticas

solamente apuntan a establecer un monitoreo en cuencas hidrográficas y a la formulación, cálculo y validación de indicadores (DANE, 2015).

La otra institución encargada de formular y monitorear indicadores de impacto ambiental es la Secretaría Distrital de Ambiente, entidad que formuló los siguientes 5 tópicos que, de manera general, contribuyen a mitigar el cambio climático: Bogotá Construcción Sostenible, techos verdes y jardines verticales, franjas de control ambiental, sistemas urbanos de drenaje sostenible e infraestructura. Estos tópicos hacen parte de la óptica del Ecourbanismo. La formulación y el cálculo de los indicadores se hacen a través del Observatorio Ambiental de Bogotá, quien cuantifica y grafica los datos e indicadores para medir la calidad del ambiente en Bogotá (ver tabla 2).

Tabla 2. Indicadores vinculados a la industria y producción de materiales.

| Indicadores ambientales Bogotá | |
|--------------------------------|--|
| Recurso natural | Indicador |
| Agua | Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano |
| | Carga contaminante de sólidos suspendidos totales en el sector industrial |
| Aire | Índice de calidad del aire-ICA |
| | Monóxido de carbono por 1 hora promedio anual- CO |
| Fauna | No aplica |
| | Zonas verdes efectivas per cápita- ZVPH |
| Suelo | Determinantes ambientales emitidos en instrumentos de gestión del suelo-DAEIGS |
| | Porcentaje de generación de residuos aprovechables por tipo de material, en el sector público distrital- Piga residuos |
| | Árboles por habitante-APH |
| Vegetación | Cobertura arbórea-CAH |
| | Subíndice de gestión de arbolado urbano-SGAU |

Selección y ciclo de vida de materiales en la construcción

La selección para el análisis se basa en dos criterios fundamentales: la tradición constructiva y la demanda de los materiales que se producen en la ciudad y el país, y que aplican a sistemas constructivos poco eficientes e insostenibles ambientalmente. Siguiendo la clasificación del ICONTEC, la selección se establece así: concreto, hormigón armado, utilizado ampliamente en la estructura portante de las edificaciones y en detalles de fachadas (alfajías y dinteles), cerámicos. Se selecciona el ladrillo, como uno de los materiales más comunes, usado principalmente en fachadas, tanto en viviendas populares como en los grandes edificios que configuran la imagen de la ciudad. Como principal material pétreo se implementa en Bogotá la piedra amarilla de canteras cercanas, declarado material no renovable por su uso indiscriminado en varios edificios (ver tabla 3).

Entre los metales se seleccionó el aluminio, que configura parte de las estructuras y los elementos de soporte de puertas y ventanas. El aluminio es el material que presenta el mayor impacto ambiental; la madera también se encuentra presente en las edificaciones de la ciudad, con menos uso en la actualidad, pero que, en otro tiempo, hizo parte de la estructura portante de las viviendas y de los cerramientos, en particular en puertas y ventanas. El vidrio conforma la mayor parte de los cerramientos de las edificaciones en la ciudad moderna, por lo tanto, su porcentaje de uso en las fachadas de las edificaciones puede estar entre el 50% y el 80%. Y, por último, se seleccionó el pvc, material que hace parte de los sistemas de funcionamiento técnico de los edificios. Se emplea en los sistemas hidráulico, eléctrico y datos. En la actualidad, las aplicaciones del pvc varían, pueden estar presentes en pisos, paneles y cubiertas (ver tabla 3).

Tabla 3. Emisión y consumo en la fase de producción.

| Emisión y consumo-Fase de producción | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|
| Clasificación | Material | CO ₂ | Energía | Agua |
| | | Por tonelada | Por tonelada | Por tonelada |
| Concreto | Hormigón Armado | 1.18 ton. | 3.072 kwh | 3.500 litros |
| Cerámicos | Ladrillo | 0.24 ton. | 763 kwh | 77.000 litros |
| Agregados | Piedra | 0.09 ton. | 41 kwh | P |
| | Acero | 2.70 ton. | 3.078 kwh | 150.000 litros |
| Metales | | | | |
| | Aluminio | 1.95 ton. | 15.000 kwh | 350.000 litros |
| Madera | Nativa | NA | 138 kwh | P |
| Vidrios | Vidrio plano | 0,04 ton. | 8.042 kwh | P |
| Plásticos | PVC | 7.65 ton. | 20.076 kwh | P |
| P= pendiente | | | | |

Los edificios consumen el 60% de los materiales extraídos de la tierra. En este sentido, la industria de la construcción y las edificaciones son las principales consumidoras de recursos, energía y materiales (Zabalza, Valero & Aranda-Usón, 2011). Por otro lado, en la Unión Europea se estima que las edificaciones consumen el 40% de la energía total; también son responsables del 30% de las emisiones de CO₂. Además, generan aproximadamente el 40% de los residuos producidos por el hombre (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2010).

Etapas del ciclo de vida de los materiales

Las etapas del ciclo de vida de los materiales se resumen de la siguiente manera (Guinée, 2002):

- **Extracción:** etapa de explotación y extracción de materias primas que genera impactos ambientales en el entorno donde se realice, por lo que se debe dar cumplimiento a la normativa de gestión ambiental y mitigación de riesgos.
- **Producción:** la materia prima se transforma en productos específicos, según el uso y aplicación. Para lograr altos estándares de calidad, las industrias desarrollan procesos técnicos, debidamente reglamentados, que minimizan la emisión de gases y la contaminación de la atmósfera.

- Transporte: es la etapa de movilización. Se da durante todo el ciclo de vida de los materiales. El costo ambiental del transporte tiene que ver con la relación entre el peso de la carga, la distancia del recorrido, el medio de transporte y el tipo de combustible empleado.
- Construcción: se producen impactos en los procesos de montaje de los sistemas constructivos, también se puede producir contaminación por las sustancias químicas utilizadas, por lo que se debe evitar el vertimiento a los cuerpos de agua. Los desechos que produce la construcción se pueden reciclar, con el fin de que genere un menor impacto ambiental.
- Uso y mantenimiento: una buena respuesta arquitectónica, ligada al sistema constructivo y a la elección acertada de materiales, determinan que el uso y mantenimiento de una edificación cumplan criterios de sostenibilidad. Esto implica que los materiales utilizados cumplan las siguientes características: durabilidad, fácil mantenimiento, uso de sustancias libres de tóxicos que puedan afectar la salud y el medio ambiente y, de ser posible, utilizar materiales que, al final de su vida útil, sean reutilizables o reciclables.
- Reciclaje: desde el punto de vista ambiental, es favorable que la edificación contenga materiales recuperables en sí mismos
- Disposición de desechos: el manejo y la gestión adecuada de la disposición final de un material debe ser tenido en cuenta desde el diseño de la edificación. En esta actividad se realizan la clasificación, el traslado y la disposición final de los residuos en obra, que son los materiales que no se pueden reciclar o reutilizar.

A graphic featuring a stylized globe with latitude and longitude lines, overlaid with several interlocking gears. The text 'Evaluación de impacto ambiental' is centered over the graphic.

Evaluación de impacto ambiental

La evaluación de impacto ambiental, que se elaboró bajo la metodología de ACV (análisis de ciclo de vida), está avalada por las normas ISO 14000, pactada en la Cumbre Mundial de Río de Janeiro, realizada en 1992. El encuentro mundial, promovido por la ONU (Organización de las Naciones Unidas), fijó las pautas para la gestión del sistema ambiental y los principios sobre medio ambiente y desarrollo sostenible. El análisis de ciclo de vida y los principios y marco general se rigen bajo la norma ISO 14040, la definición del objetivo y alcance bajo la norma ISO 14041, el análisis del inventario bajo la norma ISO 14042.

Los métodos de evaluación ambiental empleados para la investigación y el trabajo de campo se agruparon en el *software* SimaPro, herramienta que fue creada por la consultora holandesa Pré Consultants. SimaPro es un *software* de análisis de ciclo de vida (ACV, siglas en español y LCA, siglas en inglés, Life Cycle Assessment). Hoy en día, esta herramienta es empleada por más de 60 países en el mundo. SimaPro es un *software* profesional para el cálculo de los impactos ambientales asociados a un material, producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación directa en el ecodiseño, la creación de ecoetiquetas, la arquitectura, la agricultura y, en general, para el cálculo de huella de carbono, emisiones, huella hídrica e impactos en la salud humana y en la calidad del ambiente.

SimaPro tiene una base de datos de materiales y procesos muy completa, que incluye bases de datos reconocidas científicamente, entre las cuales se destaca Ecoinvent. Tiene datos de diversos sectores, tales como el de la producción de energía, el transporte, materiales de

construcción, producción de productos químicos, producción de metales, frutas y verduras. También cuenta con la base de datos de la European Life Ciclo Database (ELCD). La base de datos central ELCD contiene datos de inventario de ciclo de vida (ICV), de asociaciones y grupos de investigación a nivel de la Unión Europea (UE), de negocios y otras fuentes de materiales clave: portadores de energía, transporte y gestión de residuos.

Los materiales seleccionados para la investigación corresponden a los que tradicionalmente se utilizan en la construcción de las edificaciones en Bogotá, particularmente los cerámicos, el hormigón, vidrio y metales. En segundo lugar, se evaluaron los plásticos y algunas maderas que, en la actualidad, empiezan a tener relevancia. Los métodos de evaluación seleccionados corresponden a la categoría de variables, que calcula el impacto generado por los materiales de construcción en la calidad de los ecosistemas y en la salud humana. Los componentes de las materias primas de los materiales pueden ser tóxicos, así como los productos que, en su proceso de fabricación, alteran el bienestar humano y el impacto generado en el uso de recursos no renovables.

Metodologías de evaluación de los materiales de estudio

Eco-indicador 99(H): (la información sobre esta norma fue publicada por Pré Consultants-SimaPro) es un método orientado a la evaluación de los daños durante todas las fases del análisis de ciclo de vida. Los datos correspondientes a las categorías de impacto Eco Indicador 99 están recogidas y publicadas, en una hoja de cálculo, por el Instituto de Ciencias Ambientales de la

Universidad de Leiden, Países Bajos. Las categorías y variables de análisis son: 11 variables agrupadas en 3 categorías. La primera categoría es la salud humana, y sus variables son: partículas cancerígenas, orgánicos respirados (sustancias orgánicas inhaladas) e inorgánicos respirados (sustancias inorgánicas inhaladas). La segunda categoría corresponde al análisis de la calidad del ecosistema, y sus variables son: cambio climático, radiación, capa de ozono y ecotoxicidad (en agua dulce y tierra). La tercera categoría compete a los recursos en las siguientes variables: acidificación y eutrofización, uso de la tierra, minerales y combustibles fósiles. La categoría de daños normalizados depende de los factores de ponderación para la calidad de los ecosistemas, recursos y la salud humana. Este método se utilizó para evaluar los metales, donde se evidencia el mayor impacto en los recursos y los minerales utilizados para los procesos de fabricación (ver ficha técnica metales).

EDIP 2003: método de evaluación de impacto ambiental. La metodología EDIP 2003 analiza 18 categorías de impacto: capa de ozono, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización acuática (N-eq), eutrofización acuática (P-eq), formación de ozono (humana) extendido con factores adicionales de la IE 2.0, formación de ozono (vegetación) extendido con factores adicionales de la IE 2.0, toxicidad humana (vía de exposición a través del aire), toxicidad humana (vía de exposición a través del agua), toxicidad humana (vía de exposición a través del suelo), ecotoxicidad (aguda agua), ecotoxicidad (crónica de agua), ecotoxicidad (crónica del suelo), recursos y residuos.

Es el método de evaluación más completo, en cuanto analiza aspectos fundamentales para determinar el impacto en todas las fases del ciclo de vida de los materiales de construcción. El método se implementó para evaluar los siguientes materiales: concretos, maderas y vidrio.

Ecological Scarcity 2013: método de escasez ecológica. El método contiene 19 categorías de impacto específico, con respecto a cada sustancia un UBP (puntos de carga del medio ambiente); el puntaje final como factor de caracterización. Debido a que todas las categorías de impacto se expresan en la misma unidad UBP, se añadió una etapa de ponderación para sumar las puntuaciones. Las categorías de impacto son: recursos hídricos, recursos energéticos, recursos minerales, uso del suelo, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, principales contaminantes del aire y PM, sustancias cancerígenas en el aire, metales pesados en el aire, contaminantes del agua, metales pesados en el agua, pesticidas en el suelo, metales pesados en los suelos, sustancias radiactivas en el aire, sustancias radiactivas en el agua, residuos no radiactivos y residuos radiactivos. Esta metodología se empleó para evaluar los siguientes materiales: plásticos, piedras y cerámicos.

Hacia la resiliencia y eficiencia de materiales para la arquitectura

El impacto ambiental en el sector de la construcción se agrupa en tres aspectos:

- El consumo de recursos
- La reducción de las emisiones CO₂
- La gestión de los residuos del proceso constructivo

Es importante anotar que, en el caso de los residuos, deben ser estimados como un bien, es decir, aprovecharlos mediante el reciclaje e incorporarlos de nuevo en el proceso de producción de edificios, imitando de cierta forma a los ciclos de la naturaleza.

Materiales resilientes

Muchos materiales, aplicados a obras civiles, están sometidos a fuerzas o cargas, por eso es necesario conocer las características de los materiales. En general, el comportamiento mecánico de un material refleja la relación que existe entre la fuerza aplicada y la respuesta del mismo, es decir, evaluamos el comportamiento mecánico en términos de deformación. La mayoría de las estructuras se diseñan de tal manera que solo ocurra deformación elástica, lo que se traduce en evitar la rotura del mismo; además, es deseable conocer el nivel de tensiones con el cual empieza la deformación plástica.

Antes de definir el concepto de resiliencia en los materiales, es conveniente recordar la curva esfuerzo-deformación en un ensayo de tracción, tal como se observa en la figura 1. En el ensayo de resistencia a la tracción se mide la deformación, es decir, el alargamiento de la probeta, entre dos puntos fijos de la misma, a medida que se incrementa la carga aplicada. La deformación se representa gráficamente en función del esfuerzo, es decir, de la carga aplicada dividida por la sección de la probeta se obtiene, en general, una curva de esfuerzo-deformación. Dicha curva tiene dos zonas, desde las cuales se observa el comportamiento elástico y plástico del material y, a su vez, muestran cuatro estados bien diferenciados, como se muestra en la figura 1.

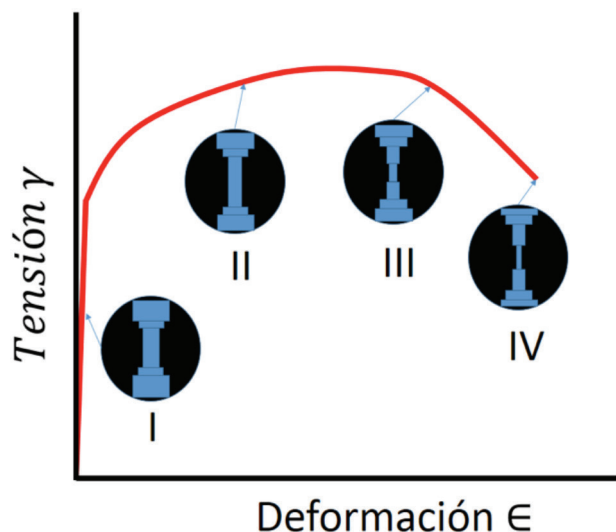


Figura 1. Curva teórica de tensión deformación de un material.
Fuente: adaptación propia a partir de Callister.

I) El primer estado representa la deformación elástica

Las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. En donde la deformación es proporcional a la tensión aplicada, podemos introducir el término módulo de elasticidad, el cual puede ser interpretado como la rigidez o resistencia de un material a ser deformado elásticamente: cuanto mayor es el módulo elástico, más rígido es el material y menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una tensión. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young (E), y se mide en pascales, en el sistema internacional de unidades. El módulo de Young es característico del material.

La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica: la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas.

II) El segundo estado pertenece a la fluencia

Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición del material entre la deformación elástica y la plástica no se aprecia de forma clara.

III) El tercer estado pertenece a la zona de deformación plástica

Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera solo parcialmente su forma, quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

IV) El cuarto estado es la estricción

Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta, apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose, hasta la rotura de la probeta en esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación. Realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura.

En general, los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la

probeta de forma brusca. Otras características referentes al comportamiento mecánico de los materiales, que pueden caracterizarse mediante el ensayo de tracción, son la resiliencia y la tenacidad.

La tenacidad es la energía total absorbida, que viene representada por el área comprendida bajo la curva tensión-deformación, hasta llegar a la rotura. La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar. La propiedad asociada a la resiliencia se denomina módulo de resiliencia, el cual se representa como U_r .

El módulo de resiliencia es la energía de deformación, por unidad de volumen, que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico. El límite elástico es justo donde el material pasa de ser elástico a plástico. Se representa como σ_y .

Desde el punto de vista matemático, el módulo de resiliencia de una probeta, sometida a una carga uniaxial uniforme, es justamente el área debajo de la curva tensión-deformación hasta la fluencia, tal como se muestra en la ecuación:

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

El módulo de resiliencia en una probeta de material elástico lineal, sometida a tensión axial uniforme, se puede escribir de la siguiente forma:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon$$

Donde σ_y es la tensión de fluencia o límite elástico y ϵ es la deformación correspondiente a dicho límite elástico. En términos de la energía absorbida en el impacto, en relación con el módulo de elasticidad del material, se puede escribir como:

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{E}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material. A partir de la ecuación anterior, podemos concluir que los materiales resilientes tienen un límite elástico muy alto y un módulo de elasticidad muy bajo. Los materiales que cumplan esta condición son muy resilientes. Las unidades de resiliencia son el producto de las unidades de los ejes del producto del diagrama tensión-deformación. En unidades del sistema anglosajón es pulgadas libra fuerza dividido por pulgada cúbica, lo que equivale a psi, mientras que el Sistema Internacional de Unidades se expresa en julios por metro cuadrado, lo que equivale a Pa.

Existe una relación entre resiliencia y tenacidad, que es generalmente monótona creciente, es decir, cuando un material presenta más resiliencia que otro generalmente presenta mayor tenacidad, pero dicha relación no es lineal. En definitiva, es la capacidad de memoria de un material para recuperarse de una deformación, producto de un esfuerzo externo. El ensayo de resiliencia se realiza mediante el Péndulo de Charpy, también llamado prueba Charpy. En un ensayo con el Péndulo de Charpy se puede calcular la resiliencia conociendo la diferencia entre la altura inicial de caída del péndulo y la altura que alcanza el péndulo posteriormente al impacto.

Un elevado grado de resiliencia es característico en los aceros austeníticos, aceros con alto contenido de austenita. En aceros al carbono, los aceros suaves (con menor contenido porcentual de carbono) tienen una mayor resiliencia que los aceros duros. Entre los materiales conocidos más resilientes se encuentran la seda de araña, el tendón, etc. El cable de acero presenta una resiliencia elevada. El módulo de resiliencia es una propiedad fundamental en pavimentos asfálticos sometidos a las cargas del tráfico. Un ejemplo de la resiliencia de algunos metales se muestra en la tabla 4.

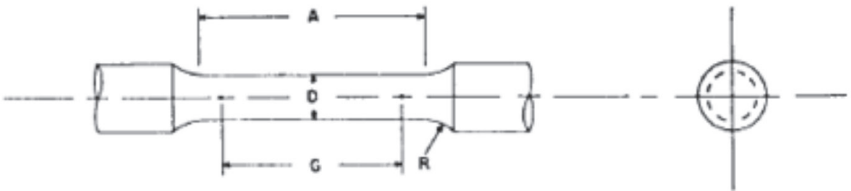
Tabla 4. Resiliencia de materiales.

| Material | Límite elástico (Mpa) | Módulo de Young (Gpa) | Ur(J/m2) |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| Acero | 830 | 207 | 16,6 X105 |
| Latón | 380 | 97 | 7,44 X105 |
| Aluminio | 275 | 69 | 5,48 X105 |
| Titanio | 690 | 107 | 22,2X105 |

Métodos de ensayo para cuantificar las propiedades mecánicas

Para cuantificar las propiedades mecánicas de tracción se hace uso del método de ensayo estandarizado bajo la ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials), con la infraestructura del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, seccional Bogotá. Este ensayo se hace con el fin de calcular la resistencia mecánica. Aunque para medir la resiliencia del material se puede hacer una aproximación de la resiliencia según la ecuación 1, mencionada anteriormente. De acuerdo a la figura 1, se realiza la extracción de la muestra de acuerdo al plano mecánico establecido y se extrae la muestra de la figura 2.

Este proceso se llevó a cabo en una máquina de CNC, para asegurar la uniformidad de las dimensiones y, de igual manera, el acabado superficial.



| | Dimensions, mm | | | | |
|---|-------------------|---|------------|------------|------------|
| | Standard Specimen | Small-Size Specimens Proportional To Standard | | | |
| | 12.5 | 9 | 6 | 4 | 2.5 |
| G—Gage length | 62.5 ± 0.1 | 45.0 ± 0.1 | 30.0 ± 0.1 | 20.0 ± 0.1 | 12.5 ± 0.1 |
| D—Diameter (Note 1) | 12.5 ± 0.2 | 9.0 ± 0.1 | 6.0 ± 0.1 | 4.0 ± 0.1 | 2.5 ± 0.1 |
| R—Radius of fillet, min | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| A—Length of reduced section, min (Note 2) | 75 | 54 | 36 | 24 | 20 |

Figura 2. Probeta normalizada bajo ASTM E8.

Una vez mecanizada la probeta (ver figura 3), se procede a hacer uso de las máquinas y herramientas de medición para ejecutar el ensayo.

En primer lugar, se hace uso de una máquina universal de ensayos, de marca SHIMADZU UH-50, de aplicación de carga de tipo hidráulica. Esta máquina cuenta con una capacidad de 50 toneladas fuerza. Se compone principalmente de dos partes: un marco de carga, que se visualiza en la figura 4, al lado izquierdo, y un sistema de mando digital, que visualiza la carga de manera analógica y digital, al lado derecho de la figura 5.

En de vista que el objetivo del ensayo es medir tanto fuerza como deformaciones, principalmente en la zona elástica, se hace uso de un sistema de medición llamado extensómetro. Esta herramienta permite medir deformaciones que van del orden de micras hasta milímetros. El dispositivo se muestra en la figura 6.



Figura 3. Probeta mecanizada de sección reducida bajo las condiciones de ASTM E8.



Figura 4. Ampliación de la sección reducida.



Figura 5. Máquina universal de ensayos del Centro de Materiales y Ensayos del SENA, seccional Bogotá.



Figura 6. Extensómetro.

Debido a que el extensómetro mide pequeñas deformaciones, se debe hacer una verificación de manera gradual, comprobando el funcionamiento del mismo con una unidad de verificación, que es en sí un micrómetro (ver figura 7).

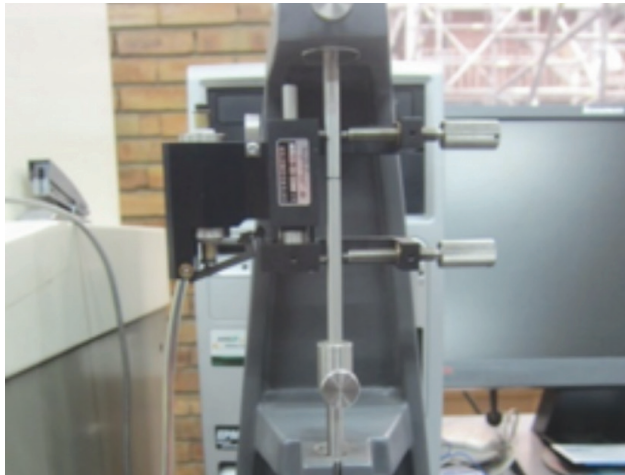


Figura 7. Extensómetro puesto en la unidad de verificación.

El extensómetro tiene como objetivo principal medir la deformación elástica, que en este caso, por ser un material dúctil, presentará una deformación alrededor de 0,25 mm. Este valor sirve para poder llevarlo a términos de porcentaje y desplazar la curva a un offset de 0,2%, donde la curva paralela que corta con la gráfica representará el esfuerzo de fluencia (ver figura 8).

El objetivo principal del ensayo de tracción es medir esfuerzos tanto elásticos como plásticos, donde un esfuerzo es la división de la fuerza dividido la unidad de área inicial, es a esto lo que llamamos esfuerzo ingenieril, y es de allí que este valor es comparable con las diversas normas existentes en cuanto a propiedades mecánicas. Por ello es importante utilizar elementos como el calibrador pie de rey (ver figura 9).

Se realiza la medición del diámetro de la sección reducida de la muestra (ver figura 10). Luego se inserta el valor en el *software* y se resetean todos los ceros, para dar inicio al proceso de montaje de la muestra.

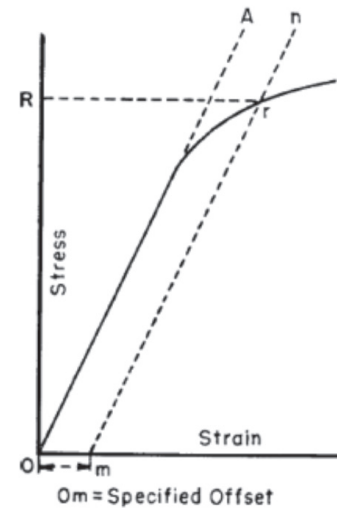


Figura 8. Método *offset* para cálculo del esfuerzo de fluencia.



Figura 9. Calibrador pie de rey.

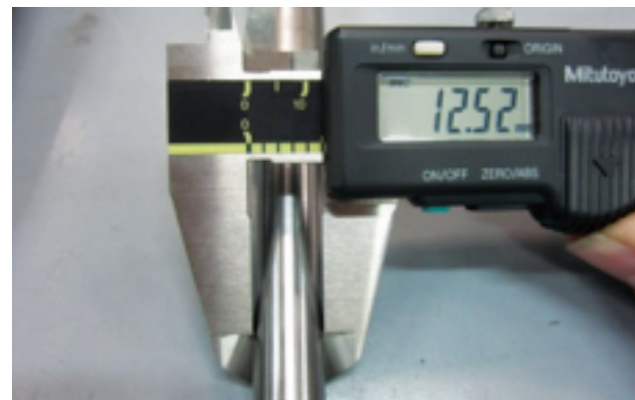


Figura 10. Medición de la muestra.

Cuando los ceros están reseteados (ver figura 11), se realiza el montaje de la muestra en el marco de carga y, de igual manera, se coloca el extensómetro sobre la muestra (ver figura 12).

Una vez se realizan las conexiones del extensómetro con la muestra metálica, se procede a realizar el ensayo. En primera instancia, se realizará la medición de la zona elástica, dado que tiene el extensómetro. Luego, el *software* demanda el retiro del extensómetro (ver figura 13) y, de esta manera, pasará a la zona plástica, realizando de igual manera la obtención de datos en tiempo real.

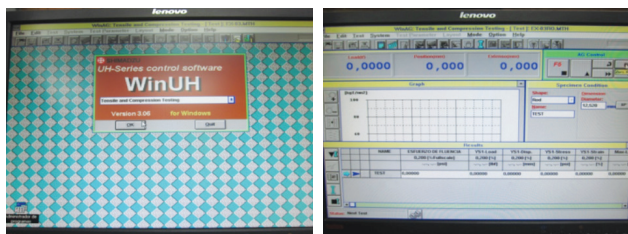


Figura 11. Imagen de la interfaz de la máquina universal, dispuesta para el proceso de medición.

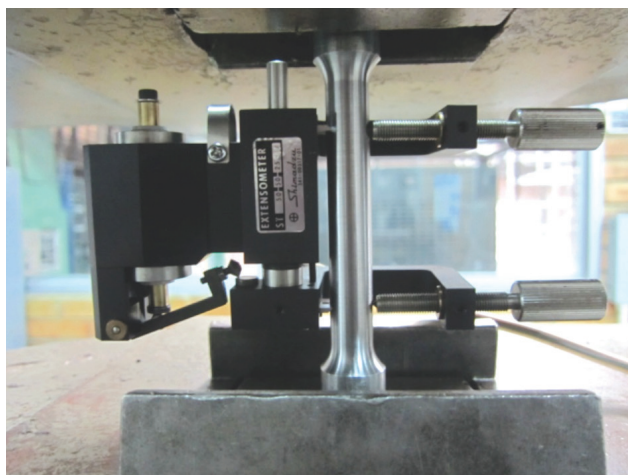


Figura 12. Extensómetro sobre la muestra dispuesta sobre el marco de carga.

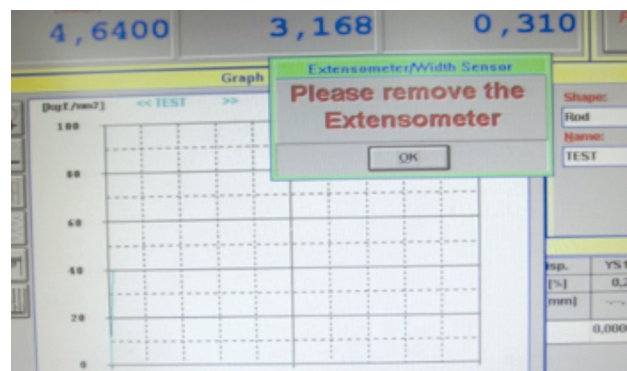


Figura 13. Software WinUH una vez ha concluido la zona elástica.

Durante el proceso siguiente, la máquina continuará realizando la aplicación de carga y los sensores obtendrán más información, para poder obtener las curvas y datos necesarios. En la figura 14 se observa cómo, a medida que la máquina realiza la aplicación de carga, la probeta aumenta su deformación, hasta crear la estricción en su área.

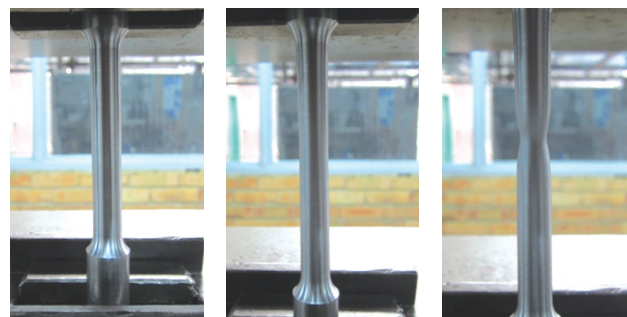


Figura 14. Proceso de deformación de la muestra metálica.

Cuando el ensayo concluye, es decir, cuando la muestra llega al estado de rotura, es medida en su diámetro final y, de igual manera, en su longitud, para poder obtener los valores de reducción de área y porcentaje de elongación (ver figura 15).

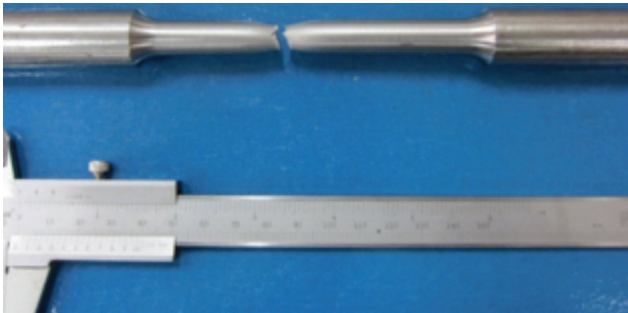


Figura 15. Probeta con sección de fractura, ensayo ya finalizado.

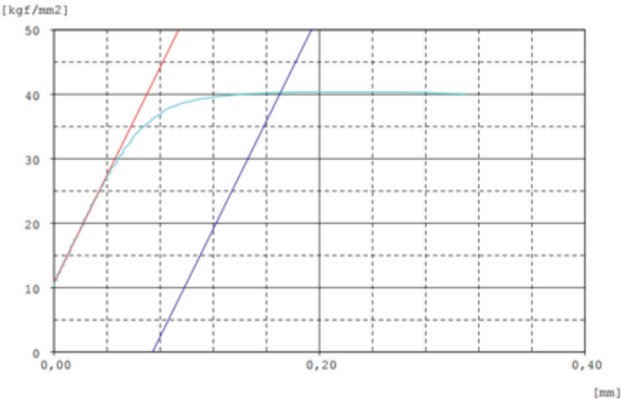


Figura 16. Curva esfuerzo y deformación de la zona elástica, con un offset del 0,2%.

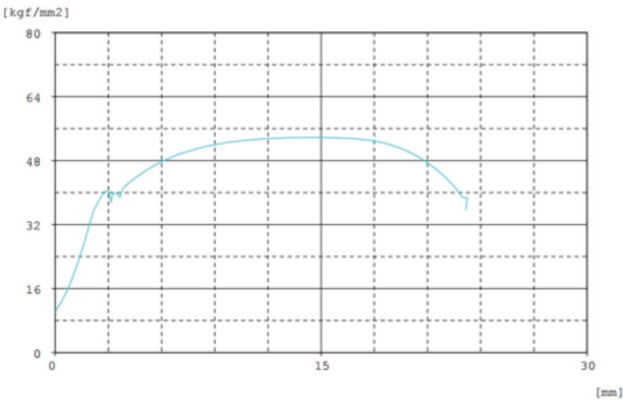


Figura 17. Curva esfuerzo vs deformación.

Cuando todos los datos están calculados, se procede a obtener las curvas de esfuerzo y deformación de la zona elástica, con un offset de 0,2% (curva azul) para calcular el esfuerzo de fluencia (ver figura 16), así como la curva esfuerzo vs deformación (ver figura 17).

Para el acero usado como método de ensayo, un acero estructural de bajo carbono ha arrojado los siguientes datos (ver figura 18):

| | | | | | |
|-----------|------------------------|-----------------|------------|--------------------|-------------------|
| Calc. | ESFUERZO DE INFLUENCIA | YS1-Load | YS1-Disp. | YS1-Stress | YS1-Strain |
| CP1, CP2 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 |
| CP Unit | [%/Fullscale] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| Pass-Fail | ---, --- | ---, --- | ---, --- | ---, --- | ---, --- |
| Unit | [psi] | [ibf] | [mm] | [psi] | [%] |
| TEST | ---, --- | 10944, 4 | 0,18750 | 57354, 0 | 0,37500 |
| Calc. | | ESFUERZO MÁXIMO | Break-Load | ESFUERZO DE ROTURA | Reduction of Area |
| CP1, CP2 | | | | | |
| CP Unit | | | | | |
| Pass-Fail | ---, --- | ---, --- | ---, --- | ---, --- | ---, --- |
| Unit | [ibf] | [psi] | [ibf] | [psi] | [%] |
| TEST | 14603, 6 | 76529, 7 | 10503, 6 | 55043, 6 | 56, 7893 |
| Calc. | Elastic | Fitted Back | | | |
| CP1, CP2 | 13,000, 18,000 | | | | |
| CP Unit | [kgf/mm2] | | | | |
| Pass-Fail | ---, --- | ---, --- | | | |
| Unit | [psi] | [%] | | | |
| TEST | 2972205 | 34, 0000 | | | |

Figura 18. Cálculos obtenidos del acero ASTM A36.

Cálculo de la resiliencia a partir de la curva esfuerzo vs deformación

Con los datos del ensayo de tracción se puede obtener una gráfica de fuerza en Newton y la deformación en m (ver figura 19). Con esto podemos obtener el área bajo la curva de la zona elástica y, con este valor, obtener la resiliencia realizando la integral con la ecuación 1, mencionada anteriormente. Para este acero se ha obtenido un valor de 16.00 J (ver figura 19).

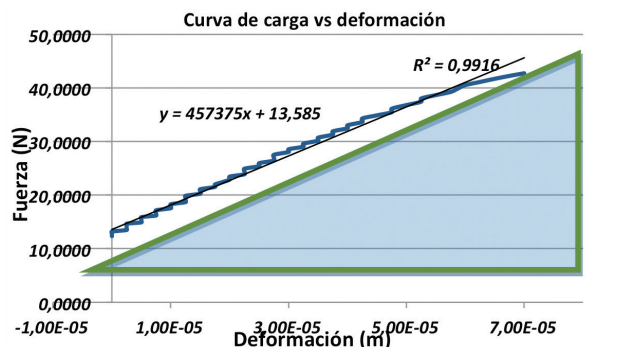


Figura 19. Curva de carga vs deformación.

Ensayo Charpy

Se presentan los datos obtenidos de absorción de energía de un Acero ASTM A 36, a diferentes temperaturas, durante el ensayo de impacto ejecutado según la norma ASTM E23. Se realizaron 18 ensayos, a 6 temperaturas diferentes, con el fin de determinar la tenacidad y la temperatura de transición dúctil-frágil (BDTT, por sus siglas en inglés) del material. La tenacidad se puede determinar inmediatamente, en el momento del ensayo, luego de realizar un tratamiento estadístico de los resultados a temperaturas específicas; en cambio, la temperatura de

transición dúctil-frágil requiere la energía de absorción a varias temperaturas. Posteriormente, se procede a tabular y a graficar los datos para determinar la BDTT.

Para el ensayo de impacto se consideran dos procedimientos: el ensayo Izod, empleado generalmente para materiales no metálicos, y el ensayo Charpy, el empleado en esta ocasión.

La máquina empleada, de origen alemán y hecha en 1973, posee una masa de 18.75 kg, una longitud del brazo de 825mm, una inclinación inicial de 18° respecto a la vertical, una resolución de 0.1 Kg, un error por pérdidas de 0.19 Kg y una capacidad máxima de medición de 30 Kg (ver figura 20).



Figura 20. Péndulo de impacto Charpy. Laboratorio de ensayos mecánicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se realizaron ensayos a temperaturas diferentes. Para alcanzar estas temperaturas, se utilizaron diferentes medios de enfriamiento o calentamiento controlado por una termocupla Fluke S1 K/J thermometer tipo K.

Para alcanzar temperaturas por debajo de la temperatura ambiente, se utilizó nitrógeno líquido puro, en solución con metanol; para temperaturas por encima del ambiente, se utilizó una estufa y un recipiente con agua (ver figura 21).



Figura 21. Dispositivo para el enfriamiento con nitrógeno líquido y calentamiento en agua de las probetas en Acero ASTM A 36.

Lograda la temperatura para cada serie de muestras, se ejecutó el ensayo de Charpy, obteniéndose los datos de la tabla 5.

Obtenidos los datos, se grafican, y de esta manera se puede determinar la transición dúctil-frágil. Se observa que, a medida que se modifica la temperatura del material, la energía absorbida en el impacto tiene una variación significativa en ciertos intervalos de temperatura; en otros intervalos podemos observar una variación estable.

Para temperaturas menores a -50°C , la energía absorbida tiene una tendencia constante, con una magnitud

Tabla 5. Resultados del ensayo Charpy.

| Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Energía absorbida (Kgm) | | Medio de enfriamiento o calentamiento |
|---------------------------------------|----------------------------|----------|---|
| | Ensayos | Promedio | |
| -200 | 0,56 | 0,50 | Nitrógeno líquido |
| | 0,47 | | |
| | 0,46 | | |
| -44 | 0,6 | 0,63 | Solución de nitrógeno líquido y metanol |
| | 0,54 | | |
| | 0,76 | | |
| 18,6 | 1,84 | 2,06 | Temperatura ambiente |
| | 2,5 | | |
| | 1,85 | | |
| 29 | 1,99 | 2,07 | Agua |
| | 2,17 | | |
| | 2,05 | | |
| 60 | 5,14 | 4,54 | Agua |
| | 3,72 | | |
| | 4,77 | | |
| 90 | 10,24 | 9,12 | Agua |
| | 9,63 | | |
| | 7,5 | | |

relativamente baja, lo que nos correlaciona un comportamiento frágil del material en dicho intervalo. A medida que la temperatura aumenta, desde -50°C a 50°C , la energía absorbida aumenta con la misma, y por encima de 50°C exhibe una variación mayor en la energía de impacto, lo que nos indicaría un probable intervalo, en donde el material experimentaría su transición dúctil-frágil. A temperaturas más elevadas, la energía de absorción alcanza su valor máximo, estabilizándose en un rango de temperatura superior, relacionando de esta manera un comportamiento dúctil del material.

De acuerdo a la gráfica obtenida para este Acero ASTM A36, existe un intervalo en el cual ocurre la transición dúctil-frágil, pero es difícil establecer con certeza el valor

de la temperatura para dicha transición. Debido a las diferentes variables involucradas en el proceso, y a algunos factores de error relacionados con la práctica, es conveniente definir un intervalo que contenga dicha temperatura. En este caso, podemos observar que dicho intervalo sería entre 60°C y 67°C.

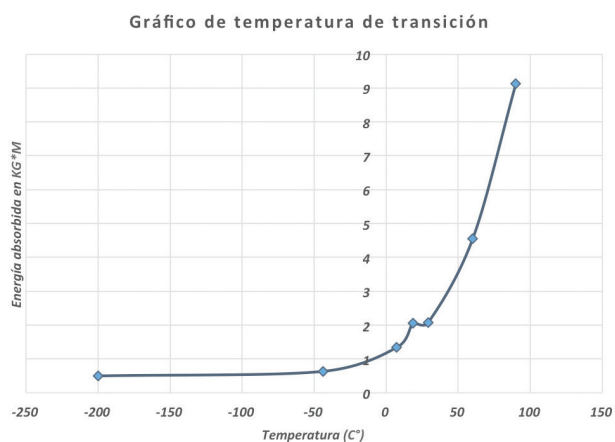


Figura 22. Gráfico de temperatura de transición.
Curva de energía absorbida en función de la temperatura.

Análisis de la superficie de fractura en función de la temperatura

Al observar la superficie de fractura mostrada en las figuras 23 y 24, después de realizado el ensayo Charpy, se pueden distinguir con facilidad dos superficies de coloración distinta, una en los bordes, de color gris oscuro y medianamente regular, y otra gris brillante, en el interior de la probeta.

El color gris oscuro en los bordes es indicativo de la energía absorbida en el impacto, cuanto mayor sea esta zona mayor será la resiliencia obtenida por el material.

Así, cuanto mayor sea la relación de áreas mayor será la resiliencia de un material respecto a otro. Alta Sgris/Sbrillante> Resiliencia, que, según los ensayos realizados a temperatura ambiente, está alrededor de 16.00 J, similar al análisis realizado utilizando el cálculo de la integral del área bajo la curva en la zona elástica, que da lugar a la resiliencia.

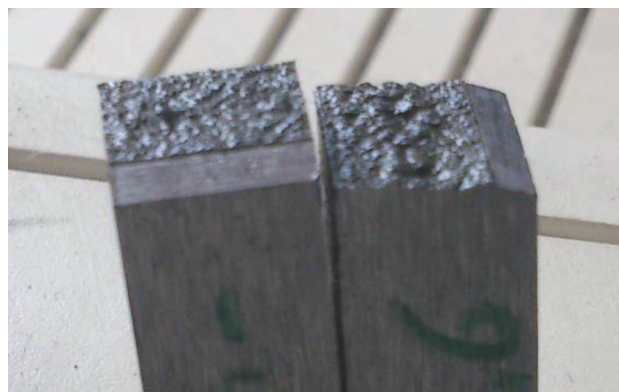


Figura 23. Superficie de fractura ASTM A36 a -44°C.



Figura 24. Superficie de fractura ASTM A36 a 90°C.

En la figura 24, la energía absorbida de impacto fue relativamente baja, la superficie de fractura muestra una textura granular, rugosa, indicando que se produjo una fractura frágil del material a dicha temperatura. En la figura 25, se observa que en la zona de fractura hay cierta evidencia de deformación plástica, la grieta no se propaga en una sola dirección o en un plano, lo que se asocia a un obstáculo en el avance de la grieta, requiriendo mayor energía para la propagación de la grieta, por lo tanto, la energía absorbida de impacto es mayor. En la figura 25, la superficie de fractura tiene una combinación de rasgos fibrosos y granulares, característicos de fractura mixta (dúctil-frágil), ya que a dicha temperatura se encuentra en el intervalo de transición dúctil-frágil.



Figura 25. Superficie de fractura ASTM A36 a 60°C.



Resiliencia: una estrategia de adaptación para enfrentar el cambio climático en Bogotá

Podemos concluir que el cambio climático afecta a los materiales de los edificios, ya que los hace más vulnerables a las condiciones climáticas adversas (Costa & Mora, 2010). Por ejemplo, el 75% de los colombianos vive en ciudades (Samad *et ál.*, 2015) que no están preparadas para responder a las nuevas condiciones extremas que está produciendo el cambio climático. Como resultado de ello, los nuevos y viejos edificios construidos en las ciudades colombianas no están en condiciones de resistir los cambios producidos por este fenómeno. En este contexto, el factor de habitabilidad se convierte en un elemento importante en el proceso de diseño de una edificación (Edwards, 2005).

Por ejemplo, en Bogotá (Colombia), el 70% de los edificios son residenciales (Escallón & Villate, 2013). Solo el 40% de estos edificios son de buena calidad (Escallón & Rodríguez, 2010). Por tanto, el crecimiento de la población de Bogotá crea una mayor demanda de recursos y energía, que impacta la capacidad de respuesta de la ciudad. Así, el cambio climático afecta la habitabilidad de los edificios de la ciudad, ya que hace que estos sean menos seguros a cualquier cambio climático extremo. Adicional a este problema, un gran número de nuevas edificaciones en Bogotá son de mala calidad, aumentando el problema (Ramírez, 2002).

Por estas razones, Bogotá necesita un cambio en la calidad de vida de sus ciudadanos y en las condiciones de sus edificaciones. En este sentido, se deben tomar medidas para dar respuestas adecuadas a los riesgos de desastre producidos por el cambio climático. Por lo tanto, es necesario proponer estrategias de diseño que permitan que los edificios sean sostenibles a largo plazo. Es decir,

las soluciones deben estar dirigidas hacia el diseño de ciudades y edificaciones resilientes que proporcionen una salida adecuada a estos fenómenos (UNISDR, 2012; ONU-UNHABITAT, 2014). Para finalizar, se propone un modelo de gestión de medio ambiente más flexible, que evalúa el factor de habitabilidad de los edificios. Este modelo puede dar algunas pautas para el diseño de edificios resilientes.

El concepto de habitabilidad

El cambio climático es una realidad. El clima extremo afecta la habitabilidad de las ciudades y de los propios edificios. Podemos observar esto hoy, por ejemplo, en la ciudad de Bogotá, donde la lluvia impredecible y los vientos extremos suelen causar daños en los edificios. Por esa razón, es necesario incluir, dentro de las estrategias de diseño de la habitabilidad, el concepto de resiliencia, que es la capacidad de un sistema para resistir diversos trastornos sin que se afecte la estructura original.

En resumen, las dimensiones económicas, ambientales y sociales deben ser consideradas en conjunto para evaluar plenamente la sostenibilidad (Sikdar, 2003). Por ejemplo, en Bogotá en los últimos años el gobierno tuvo que implementar ciertas normas para cambiar el enfoque de la construcción. El nuevo Código de Construcción de Bogotá dio diferentes soluciones para la habitabilidad y la baja calidad de las edificaciones. Una de estas recomendaciones fue poner al día las leyes de construcción de edificaciones sostenibles para la ciudad. Como resultado, el alcalde actual ha integrado el tema de la resiliencia en las políticas de Bogotá.

Hoy más que nunca, la flexibilidad orientada a la resiliencia es una condición necesaria para el concepto de habitabilidad, ya que la construcción de nuevos edificios solo se puede lograr con éxito a través del cambio y la transformación. Entonces, es esencial incluir esta variable en el proceso de diseño sostenible. Inevitablemente, hoy la mayoría de los edificios construidos en la ciudad utiliza normas de construcción deficientes, lo que significa que se produce una menor calidad en los espacios interiores y exteriores de las edificaciones.

Flexibilidad

La flexibilidad es una variable de la regulación del medio ambiente humano, porque es el factor que hace posible el cambio. Además, al ser una necesidad, la flexibilidad impide el colapso de un entorno. Al respecto, se retomaron cinco factores de flexibilidad de investigaciones anteriores: la identidad, la apropiación, la necesidad, densificación y la renovación (Cubillos, 2006). Para resumir, la variable de flexibilidad es un problema de diseño sostenible. Por ejemplo, el profesor Mahdavi (1998) explica:

El programa de flexibilidad sugiere que dada las variaciones de los ocupantes potenciando la dimensión ecológica, la habitabilidad de los edificios no debe estar vinculada con el cumplimiento de cualquier conjunto rígido de criterios de rendimiento. Más bien, la idea es medir la habitabilidad en términos de capacidad de los edificios para dar cabida a una amplia gama espacial y temporal de expectativas ambientales variables (p. 26).

En resumen, si la flexibilidad es una condición necesaria para el diseño de edificios en Bogotá, se debe valorar como una variable en la evaluación del impacto de habitabilidad y su capacidad de resiliencia en los edificios en un entorno determinado.

Los patrones sociales

En nuestro medio, los patrones sociales son una prueba de la capacidad de las personas para adaptarse a los diferentes contextos. Las personas interactúan con su entorno reconociendo los tipos de edificios que responden a su propio proceso de adaptación. Por lo tanto, la flexibilidad y los patrones sociales se identifican como elementos inter-relacionados con el reconocimiento de la necesidad de flexibilidad en las edificaciones (Cubillos, 2010).

Para ilustrar esto, se requiere un proceso de toma de decisiones en la organización de las diferentes estructuras sociales, de acuerdo con el ambiente determinado. Es decir, una jerarquía de control que consiste en patrones sociales, los cuales constituyen una analogía biológica. A esta situación se le puede llamar patrones de control (Cubillos, 2010). Por ejemplo, al respecto se dice:

Desde el siglo 20 hasta hoy, los cambios humanos importantes pueden ser detectados en la organización social y los estilos de vida, especialmente en relación con las condiciones de privacidad de sus miembros. Por un lado, el espacio doméstico se ha desarrollado como consecuencia de un aumento en las condiciones materiales relacionadas con una mayor disponibilidad de espacio, los flujos de materiales y equipos para cada individuo (Casals-Tres, Arcas-Abella, Cuchí & Altés-Arlandis, 2009, p. 411).

En síntesis, el reconocimiento de patrones sociales es una herramienta que se utiliza para identificar las variables de habitabilidad. Los patrones sociales permiten la evaluación del impacto social de los edificios y su capacidad de resiliencia.

Modelo de habitabilidad

A continuación, se presenta el modelo de habitabilidad propuesto. En este sentido, es importante explicar que hay entornos que responden a las variaciones climáticas a través de un adecuado manejo de las condiciones resilientes del ambiente. Para lograr esto, se toman en cuenta tres elementos: el hombre, los procesos constructivos y el hábitat, a fin de proporcionar edificaciones sostenibles que se mantengan en la ciudad a largo plazo.

Calidad de los edificios

Hoy en día, es común que los edificios sean diseñados de forma inadecuada y causen el síndrome del edificio enfermo (SBS) para los usuarios. Este síndrome es ocasionado por una mala selección de materiales, un bajo control en los desagües y la contaminación del aire. Por ello es importante, para el estudio del concepto de habitabilidad, el factor de habitabilidad, pues identifica otras variables. Por ejemplo, variables físicas tales como la comodidad, la salud, la satisfacción, etc. Esta definición fue propuesta por primera vez por la Organización Mundial de la Salud, en 1982, y ha sido estudiada desde entonces en diversos campos disciplinares, como por ejemplo en la medicina y la arquitectura.

Todas estas variables están directamente relacionadas con el proceso de diseño. La calidad del entorno construido

tiene implicaciones importantes para la salud de las personas (Mahdavi, 1998). Es por esta razón que la primera función de la arquitectura es la de proveer condiciones espaciales adecuadas (Casals-Tres *et ál.*, 2009). Por lo tanto, la calidad de los edificios es un elemento importante en la evaluación de las condiciones de habitabilidad.

Calidad de vida

La calidad de vida es la organización social que proporciona la satisfacción de las necesidades básicas de la mayoría de los individuos que la componen, en un proceso continuo en el tiempo, basado en la capacidad de obtener recursos del medio ambiente (Casals-Tres *et ál.*, 2009). Es importante entonces estudiar el concepto de calidad de vida, pues es una variable en el proceso de diseño.

El factor de habitabilidad tiene tres agentes que afectan la calidad de vida: el crecimiento demográfico, el cambio climático y el impacto ambiental. Además, estos agentes tienen un atributo importante: la capacidad de recuperación. Este factor de habitabilidad tiene la habilidad para resistir los cambios sin afectar significativamente el medio ambiente y la estructura de los edificios. Por lo tanto,

el estudio de la habitabilidad de los edificios es necesario, ya que pondrá a prueba los impactos generados por los agentes y determinará el grado de resistencia que los edificios deben tener para ser sostenibles en el tiempo.

En Bogotá, la industria de la construcción necesita herramientas de diseño para crear estrategias que conduzcan a la producción de edificios sostenibles y una ciudad en términos de resiliencia, pues esto mejoraría la calidad de vida de los usuarios. Por lo tanto, se necesita una propuesta de ensayos de habitabilidad para el diseño de edificios sostenibles. Un modelo teórico se propuso para las pruebas de habitabilidad para edificios. Este modelo combina diferentes variables, como las descritas arriba y otras variables de prueba de múltiples dimensiones.

La figura 26 muestra el modelo del factor de habitabilidad en los edificios. Este gráfico consiste en cuatro principales variables independientes de color azul: la calidad del edificio, la flexibilidad, la calidad de vida y los patrones sociales. A continuación, se pueden ver cinco variables: alto nivel tecnológico, medio ambiente, ahorro de energía, uso eficiente de los recursos y los nuevos materiales.

Habitabilidad

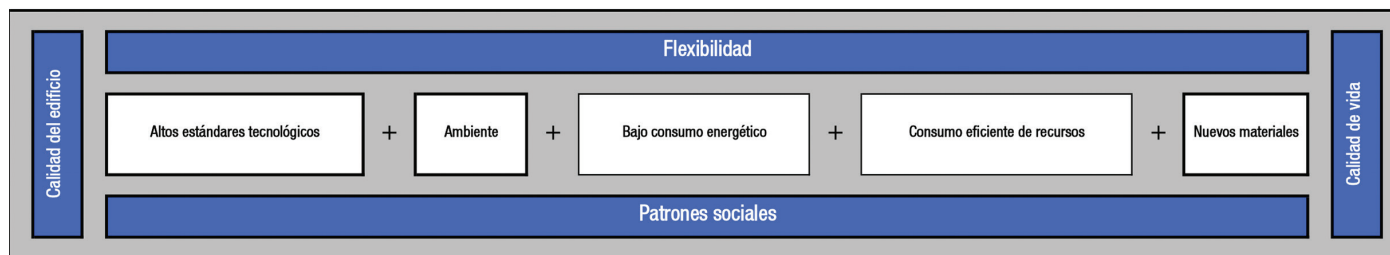


Figura 26. Modelo de habitabilidad.
Fuente: Cubillos y Rodríguez, 2013, p. 59.

Este modelo ha atravesado diferentes elementos, necesarios para la habitabilidad de los edificios, tales como la densificación, el cambio climático, la zona de la comodidad y el bienestar de los ciudadanos. Además, la intersección de estos elementos permite cuantificar el grado de ocupación de un edificio. Esta cuantificación podría permitir la posibilidad de identificar el grado de resistencia del edificio.

Modelo de administración de ambientes resilientes

Con el fin de abordar este problema, se deben diseñar edificios resilientes. Este tipo de edificaciones pueden ser resistentes al cambio climático y responden automáticamente a las variaciones del entorno, para garantizar sostenibilidad a largo plazo. La mejor manera de que los edificios resilientes respondan al cambio climático es a través de la tecnología y del planteamiento de principios de sostenibilidad resilientes. Los edificios deben estar en equilibrio con el medio ambiente, reducir los impactos y aumentar el uso de materiales sostenibles.

Tecnología resiliente

Actualmente, el concepto de resiliencia se está desarrollando en las propiedades de los materiales, tales como pavimentos y concretos, a través del cálculo del módulo resiliente. También se desarrolló en diversos campos de la ingeniería (Comfort, Boin & Demchak, 2010), así que puede ser aplicado al diseño de edificios.

Al proponer una edificación resiliente, esta puede tener un modelo organizativo central que controlaría todos

los sistemas del edificio. Es a la vez un *hardware* y *software* que es alimentado por un modelo de tecnología resiliente y un modelo de patrones de adaptación. Este analizaría y procesaría toda la información, para dar respuestas que ayudarían al diseño de edificios más eficientes y resistentes al cambio climático.

La tecnología resiliente es una nueva área de investigación. La complejidad del entorno requiere que los edificios tengan una respuesta similar a la humana. Por lo tanto, la tecnología resiliente se centra en las interdependencias únicas del sistema de control de un edificio. La tecnología integra las constantes interacciones entre el edificio, el entorno y el usuario.

La tecnología resistente tiene en cuenta todos estos elementos, así como las disciplinas que contribuyen a un diseño más eficaz, como la psicología, las ciencias de la computación, la arquitectura y la ingeniería, con el fin de desarrollar una solución interdisciplinaria. Los indicadores de materiales elásticos se utilizan para el análisis de ciclo de vida. Gracias a estos datos, los edificios utilizan materiales resilientes para responder al medio ambiente. Asimismo, el análisis de la tecnología resiliente es útil para diseñar respuestas al cambio extremo del ambiente y evaluar acciones para integrar mejor los sistemas de control, evitando fallos que provocan trastornos en el comportamiento del hábitat humano.

Patrones adaptativos al cambio climático

Por último, los datos que representan los patrones de cambio climático se identifican y se organizan con el fin de crear un modelo de clima general que se puede utilizar para predecir el comportamiento del clima futuro. Con estos sistemas de control de la información, se pueden diseñar edificios para responder de forma automática al cambio climático.

La figura 27 muestra el modelo de administración de ambientes resilientes. Este gráfico consiste en cuatro principales variables independientes de color azul: tecnología resiliente, patrones adaptativos de cambio climático, la calidad del edificio y calidad de vida. A continuación, puede ver cinco variables dependientes: modelo de administración del ambiente, ambientes autosostenibles, edificios resilientes, indicadores de materiales resilientes y análisis de tecnología resiliente.

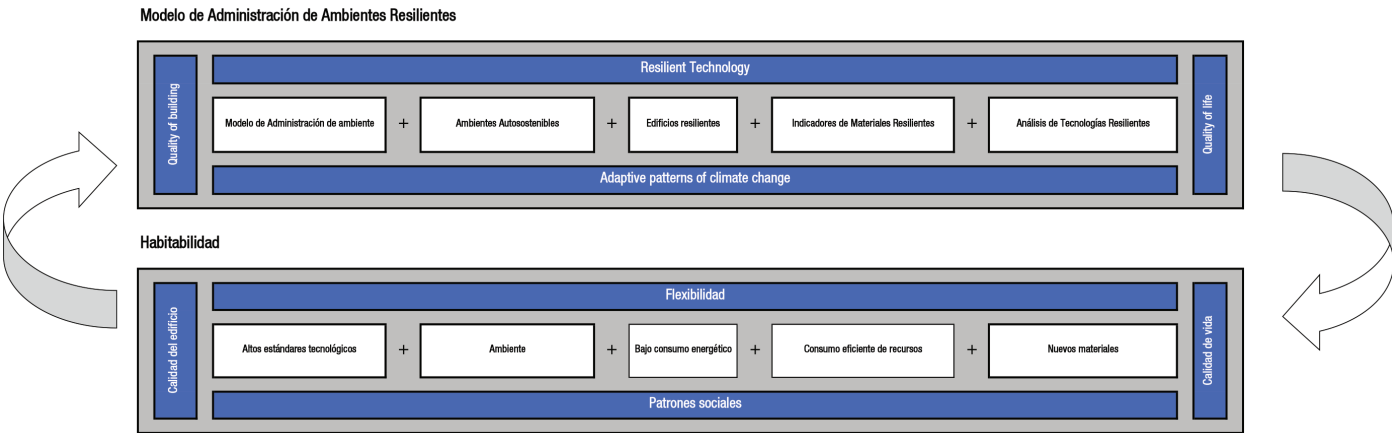


Figura 27. Modelo de administración de ambientes resilientes.
Fuente: Cubillos, 2015, p. 75.

3 Estudio de caso: el barrio Primero de Mayo de Bogotá

Rolando Arturo
Cubillos-González

Francisco Javier
Novegil-González-Anleo

| | |
|---|----|
| Introducción 3 | 72 |
| Descripción del barrio Primero de Mayo y método a aplicar en su estudio..... | 73 |
| Descripción metodología a utilizar en el estudio de caso..... | 80 |
| Resultados de la fase cualitativa | 84 |
| Resultados de la fase cuantitativa | 86 |
| Análisis ciclo de vida de los materiales del barrio Primero de Mayo..... | 91 |

Introducción 3

El propósito de este capítulo es proponer un modelo básico que contenga los criterios de resiliencia de edificaciones, y que responda al cambio climático en un área urbana de Bogotá. Para ello se seleccionó un área de vivienda en Bogotá que permitió un estudio de caso.

El capítulo se divide en cuatro partes. En la primera parte se describe brevemente la prueba piloto para la evaluación de la habitabilidad que servirá al diseño de territorios resilientes. La segunda parte explica los resultados parciales y posibles aplicaciones futuras del piloto propuesto. La tercera parte expone los resultados del experimento y sus posibles orientaciones hacia la eficiencia territorial, a partir del factor de resiliencia.



Figura 1. Barrio Primero de Mayo.

Descripción del barrio Primero de Mayo y método a aplicar en su estudio



Figura 2. Vivienda original con pequeñas modificaciones.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 3. Vivienda original con cambio de materiales e intervención en el antejardín.
Fuente: Javier Novegil (2015).

Para el diseño del modelo básico de criterios de resiliencia, se realizó un estudio experimental en dos etapas. La primera etapa del experimento consistió en seleccionar una pequeña área urbana, que podría observarse en su totalidad, y donde es posible aplicar todas las variables del estudio a la vez. Por esta razón fue elegido el barrio Primero de Mayo (ver figura 1, página anterior). El barrio es un importante hábitat urbano en la ciudad, se encuentra en la Localidad Cuarta de Bogotá y está compuesto por 11 manzanas.

La Alcaldía Mayor de Bogotá ha clasificado al barrio como Patrimonio Cultural de la ciudad. Este hábitat tiene algunos valores urbanos que representan un importante ejemplo de planificación y urbanismo en Bogotá. Sin embargo, actualmente el barrio sufre una serie de adaptaciones por parte de los usuarios que comprometen su sostenibilidad.

De acuerdo con el capítulo dos, el trabajo de campo consistió en evaluar, de manera preliminar, las variables del modelo de habitabilidad propuesto para ser aplicadas en el barrio. Recordemos que un factor importante para el análisis de la resiliencia es la habitabilidad.

En el trabajo de campo, las 11 manzanas del barrio fueron analizadas. El estudio identificó que el material es un mediador entre las condiciones interiores y exteriores de los edificios (ver figura 2), porque los materiales regulan las condiciones del aire, con el fin de garantizar un buen confort a los usuarios de un edificio. En el barrio Primero de Mayo se observa que los materiales utilizados no tienen un buen ciclo de vida (ver figura 3), ya que los usuarios han realizado muchos cambios en los edificios y materiales, mezclándolos indiferentemente sin considerar el proceso de ciclo de vida (ver figuras 4 y 5).

Este tipo de adaptaciones hace insostenible la calidad y el confort del barrio en el tiempo (ver figura 6). La Alcaldía Mayor de Bogotá, mediante sus diferentes planes de ordenamiento territorial (POT), ha regulado el barrio como Patrimonio Cultural, pero ese tipo de leyes no ha impedido que las adaptaciones de los usuarios se realicen (ver figuras 7 a 9 de la página siguiente). Además, se observa que las condiciones climáticas actuales afectan los edificios y causan algunos problemas de humedad.

Este problema fue observado en 75% de los edificios. Es más común en las calles principales, como la Avenida Primero de Mayo y la carrera Sexta. También, se observó que en estas calles se transformó el uso de los edificios, pasando de ser viviendas a usos comerciales. En el barrio, aunque el proceso de adaptación se llevará a cabo en un período más largo, cambiará el paisaje tradicional. La hoja de datos muestra que no existe una relación entre todas las variables del modelo de habitabilidad. Por ejemplo, la variable tecnología dista mucho de la variable de entorno, eso explica las observaciones en el trabajo de campo. El material mezcla algunos otros problemas, como las enfermedades respiratorias. El estudio no profundizó en la salud, por lo tanto, es importante desarrollar un estudio médico sobre el tema.



Figura 4. Vivienda original con modificaciones, cambio de uso y cambio de materiales.

Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 5. Vivienda original con pequeñas modificaciones.

Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 6. Viviendas con cambio de uso y ampliaciones en sus antejardines.

Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 7. Modificación total de la vivienda original y cambio de los materiales.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 10. Dos tipos de cambios en la vivienda original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 8. Transformación de las viviendas e introducción de nuevos materiales.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 11. Detalle de los cambios en las viviendas originales.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 9. Modificación de la vivienda original y cambio de los materiales.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 12. Transformación y densificación de la vivienda.
Fuente: Javier Novegil (2015).

Respecto al cambio del perfil urbano original, en la figura 13 se observa el cambio de perfil del barrio, el cual ha sido remplazado por una imagen más común que se observa en otros los barrios populares de la ciudad. Asimismo, se evidencia la necesidad de densificar el lote. Al respecto, se observa una subdivisión de la propiedad individual de la edificación, siendo remplazada por propiedad horizontal. Es decir, se pasa de una vivienda unifamiliar a viviendas multifamiliares.

Sin embargo, se observa que aún permanecen viviendas originales con cambios mínimos en el antejardín. En la figura 14 se observa este fenómeno. Esto es debido a que, según lo estudiado, aún permanecen familias originales que pretenden mantener la imagen original de sus viviendas, introduciendo cambios menores en las zonas de sesión.

Por otro lado, en otros sectores del barrio, en especial en la manzana 3, se observa la destrucción total de la tipología original (ver plano de localización de la manzana en la figura 1). Al respecto, en la figura 15 se observa cómo se ha destruido completamente la vivienda original y se ha remplazado por una vivienda densificada, que incluye usos mixtos, introduciendo un local comercial a un costado del antejardín. La vivienda ha perdido toda la calidad habitacional. En la figura 15 se evidencian problemas de iluminación, mezcla de materiales y el remplazo de una estructura racional por una intuitiva y arbitraria.



Figura 13. Cambio del perfil urbano original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 14. Vivienda original con cambios mínimos en el antejardín.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 15. Destrucción total de la tipología original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 16. Perfil urbano con diferentes modificaciones.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 17. Casa original en entorno modificado.
Fuente: Javier Novegil (2015).

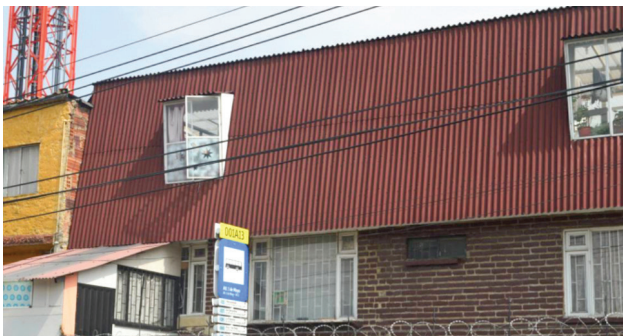


Figura 18. Utilización de nuevos materiales.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 19. Modificación total del perfil urbano, introducción de nuevos materiales y sistemas tecnológicos.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 20. Cambio de la fachada, ocupación del antejardín e introducción de nuevos materiales.
Fuente: Javier Novegil (2015).

Las manzanas 1, 2 y 3 del barrio (ver localización en la figura 1) aun permiten la convivencia de viviendas originales junto a viviendas transformadas. En la figura 21 se muestra la variedad en el perfil urbano y cómo las viviendas originales van siendo absorbidas por los cambios generales que se presentan en el barrio. La introducción de materiales diferentes a los originales evidencian la introducción de problemas de humedad en las viviendas.

Por otro lado, se observa el intento de los habitantes de realizar transformaciones y mantener de alguna manera la imagen original de las viviendas. En la figura 22 se observa la transformación lateral de una vivienda original. La transformación consiste en la ampliación del área de primer y segundo piso manteniendo los materiales originales y el tipo de cubierta propuesto.

En la figura 23 se observa hacia el interior de la manzana 3 el cambio en el perfil urbano original por uno más moderno. Hacia el centro izquierdo de la ilustración se observa la densificación interna de la manzana por edificaciones de tres pisos con materiales diferentes a los existentes. Se destaca la introducción de vidrio y metal. Asimismo, los enrejados se convierten en patrón común en todos los antejardines.



Figura 21. Viviendas originales junto a viviendas transformadas.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 22. Vivienda original con transformación lateral.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 23. Cambio en el perfil urbano original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 24. Cambio en el perfil urbano.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 27. Transformaciones en la vivienda original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 25. Vivienda original.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 28. Cambio en la tipología de la vivienda.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 26. Vivienda original junto a viviendas transformadas.
Fuente: Javier Novegil (2015).



Figura 29. Nuevos materiales y transformación total de las viviendas.
Fuente: Javier Novegil (2015).

Descripción de la metodología a utilizar en el estudio de caso

El método utilizado para desarrollar la primera etapa del piloto fue de carácter cualitativo-cuantitativo, y se desarrolló de la siguiente manera:

1. Fase cualitativa: primero se desarrolló un diseño no experimental, con una técnica de observación directa en campo. Para ello, se organizó un equipo de trabajo que fue al barrio Primero de Mayo, en donde se observaron las siguientes variables propuestas por el modelo de habitabilidad: calidad de la edificación, calidad de vida, flexibilidad y patrones sociales. Con esta técnica se buscó observar las variables propuestas y su posible relación en el contexto natural. Además, la primera fase del estudio se centró en analizar cuál era el nivel o estado de las variables de estudio, en un momento dado. El objetivo era controlar el fenómeno a estudiar, para ello emplea el razonamiento hipotético-deductivo. Asimismo, se emplearon muestras representativas y el uso de técnicas de diseño experimental, como estrategia de control y metodología cuantitativa para analizar los datos (Cubillos, 2015).
2. Fase cuantitativa: para validar las percepciones obtenidas en campo, se emplearon unas muestras representativas y el uso de técnicas de diseño experimental como estrategia de control y metodología cuantitativa para analizar los datos. A continuación, se desarrolló un diseño de experimento aleatorio, por medio de la simulación, para identificar posibles escenarios de acción. Para ello, con los datos recolectados en la etapa no experimental se realizó un muestreo aleatorio simple, con el cual se simulaban posibles escenarios para la solución de los efectos de las variables sobre el contexto de estudio. En este ejercicio se manipularon deliberadamente

Tabla 1. Diseño factorial fase 1 adaptado al español.

| Habitabilidad | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------|----------------------------|-------------------|---|--|------------------------|---------------------------------|----------|-------------------|----------|
| | | Flexibilidad (Factor 3) | | | | | Patrones sociales (Factor 4) | | | |
| Calidad del edificio (Factor 1) | ITEM | | Material B1 | Eficiencia en el consumo de recursos B2 | | | Bajo consumo energético C1 | | Salud C2 | |
| | Tecnología | A1 | Habitabilidad B1) | (A1, Habitabilidad B2) | | (A1, Habitabilidad B2) | Habitabilidad C1 | (A1, C1) | Habitabilidad C2) | (A1, C2) |
| Calidad de vida (Factor 2) | Ambiente | A2 | Habitabilidad B1) | (A2, Habitabilidad B2) | | (A2, Habitabilidad B2) | Habitabilidad C1) | (A2, C1) | Habitabilidad C2) | (A2, C2) |

Fuente: Cubillos, 2015, p. 120.

las variables de estudio, observadas en el trabajo de campo, para identificar las posibles relaciones entre las causas del fenómeno de estudio y medir el efecto que tienen las variables del modelo de habitabilidad en el contexto analizado (Cubillos, 2015).

En la fase cualitativa, la metodología propuesta enfocó su análisis en las relaciones entre las características de las variables independientes: calidad de los edificios, calidad de vida, flexibilidad y patrones sociales. El análisis factorial identificó que, para la interacción de las cuatro variables independientes, era necesario el diseño de una matriz de dos niveles. La matriz permitió determinar el grado de relación de las diferentes variables del modelo de habitabilidad.

En este caso, se identificó que la construcción del factor de habitabilidad se relaciona con la forma y el uso del espacio de un hábitat urbano. Los componentes seleccionados para caracterizar la habitabilidad fueron: calidad de los edificios, calidad de vida, flexibilidad y patrones sociales. El primer paso es identificar el grado de adaptación a un espacio, y el segundo, identificar el tipo de comportamiento y actividades que un habitante tiene la intención de llevar a cabo en un espacio. Por lo tanto,

estas cuatro características se refieren a las propiedades físicas del espacio de un hábitat.

En este caso, se determinó como unidad de análisis la variable de habitabilidad. Esta selección se hizo con el fin de comprobar si esta variable podría ser un factor de análisis para identificar componentes relacionados con el concepto de resiliencia en edificios y en el hábitat urbano. Además, se encontró que el concepto de habitabilidad se discute generalmente en términos urbanísticos y arquitectónicos.

Sin embargo, los mecanismos utilizados para medir la habitabilidad de un hábitat urbano no son claros. Por lo tanto, fue necesario definir las variables de estudio en ocho unidades experimentales, y determinar unos lineamientos para un futuro estudio sobre el tema. Con esta herramienta se realizó el análisis del factor de habitabilidad, para determinar el grado de respuesta al cambio climático, a la resiliencia y a la sostenibilidad (ver tabla 7).

Con esta matriz de doble entrada se construyeron las siguientes unidades experimentales:

- 1) Habitabilidad es equivalente a la tecnología aplicada a los edificios, junto con el tipo de materiales usados para construirlos = (tecnología x material), $H = (A1\ B1)$.
- 2) Habitabilidad es equivalente a la tecnología de la construcción, junto con la consumición de recursos eficientes del edificio en su ciclo de vida. Habitabilidad = (tecnología x consumo eficiente de recursos), $H = (A1\ B2)$.
- 3) Habitabilidad es equivalente a la tecnología de la construcción junto con la posibilidad de implementar una estrategia de consumo de energía inferior. Habitabilidad = (tecnología x menor consumo de energía), $H = (A1\ C1)$.
- 4) Habitabilidad es equivalente a la tecnología de la construcción que se puede aplicar en el hábitat, junto con el ambiente sano que se puede generar en el tiempo. $H = (tecnología\ x\ salud)$, $H = (A2\ C2)$.
- 5) Habitabilidad es equivalente al medio ambiente mediante la construcción de materiales que componen dicho hábitat urbano. $H = (entorno\ x\ material)$, $R = (A2\ B1)$.
- 6) Habitabilidad es equivalente a la comodidad del entorno de un hábitat por el consumo de recursos del hábitat mismo. $H = (entorno\ x\ consumo\ eficiente\ de\ recursos)$, $R = (A2, B2)$.
- 7) Habitabilidad es equivalente a la calidad del hábitat por el consumo de la energía potencial de dicho hábitat. $H = (entorno\ x\ menor\ consumo\ de\ energía)$, $R = (A2\ C1)$.

- 8) Habitabilidad es equivalente a la calidad de vida de un hábitat en los espacios saludables que se pueden generar con el tiempo. $H = (entorno\ x\ salud)$, $R = (A2\ C2)$.
- 9) Además, se estimó la diferencia en la habitabilidad promedio factor de los componentes de calidad de la construcción (A1) y calidad de vida (A2), en los niveles de flexibilidad (B) y patrones sociales (C). Simple efecto se observó que es equivalente a $(A1\ B1) - (A2\ B2) - (C1, C2)$.
- 10) Los efectos principales del factor de habitabilidad de este modelo fueron la diferencia entre el promedio total para el componente de calidad de la construcción y el promedio total de la calidad de vida componente, es decir, $(A1) - (A2)$.
- 11) Por último, los efectos secundarios o la interacción del factor habitabilidad estimada por la diferencia de las unidades experimentales: $[(A2\ C2) - (A2\ C1) - (A2\ B2) - (A2\ B1)] - [(A1\ C2) - (A1\ C1) - (A1\ B2) - (A1\ B1)]$.

Para probar el concepto de habitabilidad fue necesario construir dos hojas de datos, para evaluar las variables de diseño (tablas 8 y 9).

- 12) La primera hoja de datos evaluó las variables de tecnología: materiales, consumo de recursos eficiente, menor consumo de energía y salud.
- 13) La segunda hoja de datos evaluó el medio ambiente, utilizando las mismas cuatro variables de la hoja de datos anterior.

- 14) Para las diferentes variables se determinó un puntaje cuantitativo para poder cuantificarlas. La escala de evaluación fue de 1 a 100 puntos, con cuatro categorías de puntaje: 100, muy bueno; 70, bueno; 50, malo; y 1, muy malo. Cabe anotar que este puntaje aún está en proceso de calibración y perfeccionamiento.
- 15) Luego, se diseñó un modelo de simulación estocástica. La información del trabajo de campo fue simulada; para ello, se utilizaron las mismas variables y parámetros del trabajo de campo. Para realizar las simulaciones fue necesario organizar tres grupos de datos: dos grupos experimentales y el último fue clasificado como grupo de control.

Luego se realizó un experimento utilizando MS Excel. En primer lugar, los cálculos se llevaron a cabo introduciendo números de forma aleatoria en una matriz de diferentes variables propuestas. El modelo se midió mediante 30 simulaciones, divididas en tres grupos.

Para tener un mejor punto de vista objetivo, los grupos se dividieron en dos partes. El primero fue el grupo control (Grupo 1, ver gráfica 5) y los otros eran los grupos experimentales (Grupo 2 y 3, ver gráficas 6 y 7). Luego se calculan el efecto global, los efectos individuales, el efecto principal y el efecto de la interacción entre las variables. El término simulación de un proceso estocástico significa que las variables se estudian a partir del análisis del tiempo. Es decir, desde el día de hoy hacia el futuro. Con ello se plantean posibles escenarios. A continuación, se grafican los pasos del trabajo de campo (ver gráfica 1):

El estudio muestra que actualmente el factor de habitabilidad en el barrio es ineficiente, y es posible que la sostenibilidad del barrio esté muy pronto en peligro. Es importante implementar una serie de estrategias con el fin de dar un mejor punto de vista para el diseño de estrategias sostenibles. Un modelo de simulación fue creado para poner a prueba el factor de habitabilidad para el uso futuro en el barrio.

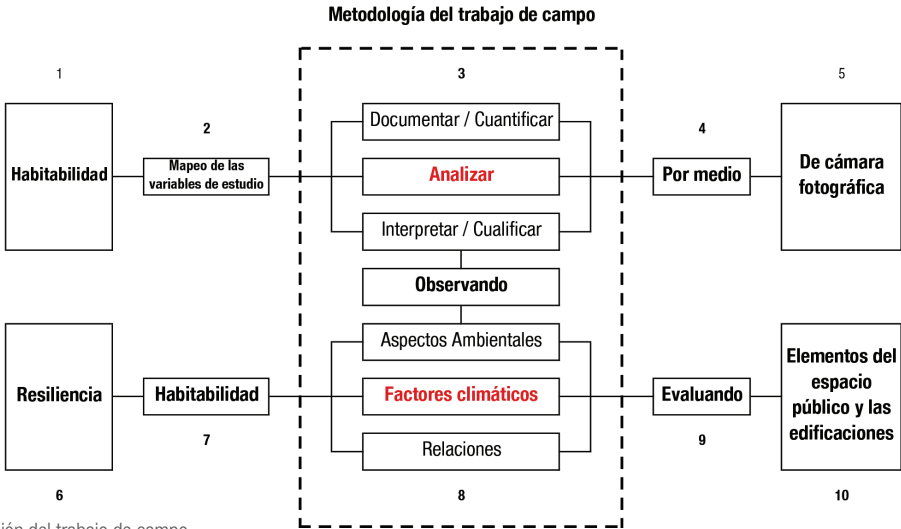


Figura 30. Pasos para la realización del trabajo de campo.

Resultados de la fase cualitativa

Se observó que, en cuanto a los efectos generales de la interrelación entre las variables de estudio, cada uno afecta el hábitat urbano de una manera similar. Por ejemplo, el principal impacto sin estrategias sostenibles es 7,5% en trabajo de campo, con base en la información. El grupo control muestra que el impacto es 6,5% si se implementan estrategias sostenibles. Los grupos experimentales muestran que, si usted combina dos de las tres variables al mismo tiempo, el impacto ambiental es de 1,30% a 1.25%. Esto demostró el importante impacto de las estrategias sostenibles (ver figura 31). Sin embargo, este tipo de acciones tendría efectos secundarios que, en el caso del barrio Primero de Mayo y el grupo 1, están de 4.0% a 6,4%. Por otra parte, grupos de dos y tres muestran de 2,7% a 1,64% del impacto al medio ambiente y tecnología. En todos estos casos, estos porcentajes son negativos (ver figura 32).

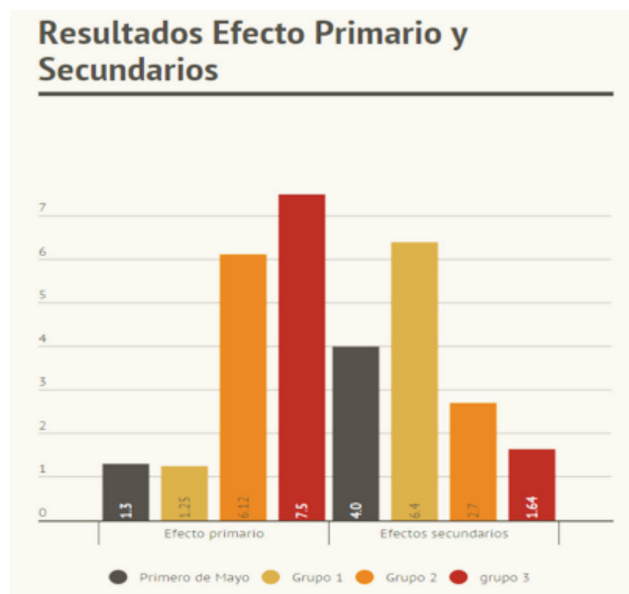


Figura 31. Resultados efecto primario y efectos secundarios.

Relaciones

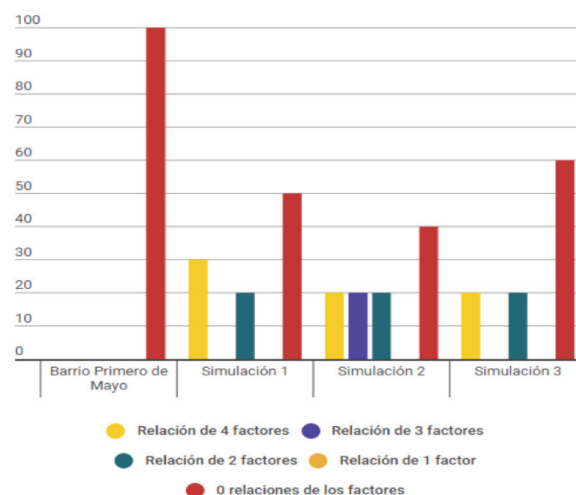


Figura 32. Resultados de las relaciones entre factores.


Uno puede ver que el efecto principal se refleja en el comportamiento de las variables tecnología y medio ambiente, en relación con el factor de habitabilidad. Los resultados del modelo muestran que un alto impacto ambiental, en un entorno urbano, afecta las condiciones de habitabilidad. También muestra que un alto impacto ambiental afecta la flexibilidad. Es decir, la habitabilidad de un hábitat urbano depende de la culminación de varias acciones, que responden juntas al sistema afectado. Por último, el modelo muestra que las variables de eficiencia energética versus el elemento material de habitabilidad afectan a los edificios, y esto, a su vez, afecta las variables de flexibilidad de un hábitat urbano. Esto significa que habrá una mayor necesidad de habitabilidad, ya que el hábitat urbano no tiene la capacidad para responder a los cambios del usuario (ver tabla 3).

Tabla 2. Hoja de datos No. 1 Factor calidad de la edificación vs flexibilidad y patrones sociales.

| Factor | Calidad de la Edificación (Factor 1) Puntos | Flexibilidad 1-100 Puntos | (Factor 3) | Patrones sociales 1-100 Puntos | (Factor 4) |
|------------|---|------------------------------|---|-----------------------------------|------------|
| Variable | Tecnología A1 | Materiales B1 | Eficiencia en el consumo de recursos B2 | Bajo consumo energético C1 | Salud C2 |
| Manzana 1 | 30 | 20 | 30 | 30 | 30 |
| Manzana 2 | 40 | 30 | 30 | 40 | 50 |
| Manzana 3 | 40 | 40 | 30 | 50 | 30 |
| Manzana 4 | 40 | 30 | 40 | 60 | 40 |
| Manzana 5 | 50 | 20 | 40 | 40 | 40 |
| Manzana 6 | 60 | 30 | 20 | 50 | 30 |
| Manzana 7 | 50 | 20 | 40 | 40 | 40 |
| Manzana 8 | 50 | 50 | 50 | 80 | 60 |
| Manzana 9 | 40 | 40 | 50 | 60 | 40 |
| Manzana 10 | 60 | 30 | 50 | 50 | 50 |
| Manzana 11 | 70 | 30 | 60 | 80 | 60 |
| Promedio | 48 | 31 | 40 | 53 | 43 |
| Media | 50 | 30 | 40 | 50 | 40 |
| Moda | 40 | 30 | 30 | 40 | 40 |

Tabla 3. Hoja de datos No. 2 Factor calidad de vida vs flexibilidad y patrones sociales.

| Factor | Calidad de Vida (Factor 2) Puntos | Flexibilidad 1-100 Puntos | (Factor 3) | Patrones sociales 1-100 Puntos | (Factor 4) |
|------------|---|------------------------------|---|-----------------------------------|------------|
| Variable | Ambiente A2 | Materiales B1 | Eficiencia en el consumo de recursos B2 | Bajo consumo energético C1 | Salud C2 |
| Manzana 1 | 30 | 60 | 50 | 30 | 30 |
| Manzana 2 | 30 | 60 | 50 | 20 | 90 |
| Manzana 3 | 20 | 50 | 60 | 10 | 20 |
| Manzana 4 | 30 | 60 | 80 | 70 | 70 |
| Manzana 5 | 30 | 50 | 60 | 10 | 20 |
| Manzana 6 | 40 | 20 | 20 | 60 | 20 |
| Manzana 7 | 30 | 30 | 50 | 20 | 10 |
| Manzana 8 | 30 | 40 | 40 | 10 | 70 |
| Manzana 9 | 20 | 50 | 20 | 60 | 50 |
| Manzana 10 | 20 | 60 | 30 | 20 | 30 |
| Manzana 11 | 40 | 50 | 10 | 60 | 30 |
| Promedio | 29 | 48 | 43 | 34 | 40 |
| Media | 30 | 50 | 50 | 20 | 30 |
| Moda | 30 | 60 | 50 | 20 | 30 |



Resultados de la fase cuantitativa

En la fase cuantitativa, la metodología propuesta se centró en el análisis de las relaciones y características entre las variables independientes resiliencia, eficiencia energética y habitabilidad. A continuación, se procedió a elaborar un modelo teórico que detalla el análisis factorial de la resiliencia, a fin de evaluar la eficiencia energética en un hábitat urbano.

Para identificar las relaciones y las características de las variables seleccionadas, se aplicaron dos técnicas, a saber: el análisis factorial y la investigación de operaciones. El análisis factorial identificó la interrelación de las tres variables independientes, a través de la construcción de una nueva matriz de dos niveles. La matriz permitió determinar cuál es la relación y el efecto de la habitabilidad y la capacidad de resiliencia en la eficiencia energética de un territorio.

La investigación de operaciones (Muñoz & Ochoa, 2011) permitió la construcción de un modelo matemático para un experimento teórico, el cual posibilitó observar el comportamiento del factor de resiliencia en un hábitat urbano. A partir de estas dos técnicas, estos fueron los pasos siguientes: 1) Identificación de las variables independientes y dependientes; 2) Construcción de unidades experimentales que mostraron las relaciones entre las variables; 3) Identificación de los efectos de estas interrelaciones, y 4) Identificación de las fortalezas y limitaciones del modelo diseñado.

Como se dijo anteriormente, para la construcción del factor de resiliencia se seleccionaron dos variables independientes: habitabilidad y eficiencia energética. La habitabilidad se relaciona con la forma y el uso del espacio de un hábitat urbano. Los componentes seleccionados

para caracterizar la habitabilidad fueron: flexibilidad y comodidad. La primera es para identificar el grado de adaptación de un espacio y la segunda identifica el grado de confort que un habitante requiere en un espacio. Por lo tanto, estas dos características se refieren a las propiedades físicas del espacio en un hábitat urbano.

Para esta investigación, la resiliencia se determina como la unidad de análisis. Esta selección se hizo con el fin de verificar si la variable resiliencia podría ser un factor de análisis, utilizado para evaluar la eficiencia energética de los edificios. Además, se identificó que el concepto de resiliencia, en general, se discute en términos urbanos. En consecuencia, se requiere un análisis del comportamiento de la capacidad de recuperación de un hábitat y cómo esto influye en su respuesta al cambio climático y la sostenibilidad. Por lo tanto, para analizar dichos comportamientos se establecieron las siguientes cuatro unidades experimentales (tabla 10):

- 1) La resiliencia es equivalente a la flexibilidad del material por un espacio que conforma dicho espacio. Resiliencia = (Flexibilidad x material), $R = (A1 \ B1)$.
- 2) La resiliencia es equivalente a la comodidad de un espacio por la materialidad del mismo espacio. Resiliencia = (Confort x material), $R = (A2 \ B1)$.
- 3) La resiliencia es equivalente a la espacialidad de un edificio por el potencial de flexibilidad espacial de dicho edificio. Resiliencia = (Flexibilidad x edificación), $R = (A1 \ B2)$.
- 4) La resiliencia es equivalente a la espacialidad de un edificio por la comodidad que se puede generar con el tiempo. Resiliencia = (Confort x edificación), $R = (A2 \ B2)$.

Además, la diferencia en el factor medio de la resiliencia para la flexibilidad, componentes (A1) y Confort (A2) en el nivel de factor de eficiencia de energía, se estimó material del componente (B1). Simplemente se observó que $(A1 \ B1) - (A2 \ B2)$. Los principales efectos del factor de habitabilidad, para este modelo, fueron la diferencia entre el promedio total para el componente de la flexibilidad y la media total para el componente de confort, es decir, $(A1) - (A2)$. Finalmente, los efectos secundarios o la interacción entre el factor de resistencia y el factor de habitabilidad se estimaron por la diferencia de las unidades experimentales: $[(A2 \ B2) - (A1 \ B2)] - [(A2 \ B1) - (A1 \ B1)]$.

La prueba de este modelo en la vida real evidenció que es necesario cubrir, en el trabajo de campo, una mayor acotación de los instrumentales que no pudieron ser cubiertos por esta investigación. En consecuencia, para esta fase se optó por una versión simplificada o prototipo experimental (Ríos, Ríos y Martín, 2009). A continuación, se realizó un modelo lógico-matemático para describir, por medio de la estimulación del comportamiento básico, el factor de resiliencia y enfrentarlo a factores de habitabilidad y eficiencia energética.

Por tanto, se realizó un nuevo experimento usando MS Excel (ver tabla 11). En primer lugar, los cálculos se realizaron mediante la introducción de números aleatorios en una matriz de diferentes variables propuestas. El modelo se midió por 400 simulaciones. Una muestra de 10% fue tomada, con la cual se hizo el modelo de análisis. Finalmente, se calcularon el efecto general, el efecto primario, el efecto simple y la relación entre las variables.

Tabla 4. Diseño factorial simulación fase cuantitativa.

| Diseño Factorial | | | | |
|----------------------------------|-------------|--------------------------|---------------------|------------|
| Eficiencia energética (factor 2) | Material | Habitabilidad (factor 1) | | Relaciones |
| | | Flexibilidad | Confort | |
| | | (A1) | (A2) | |
| | | Resiliencia (A1 B1) | Resiliencia (A2 B1) | |
| | Edificación | Resiliencia (A1 B2) | Resiliencia (A2 B2) | |
| | | (B2) | (A2 B2) | |

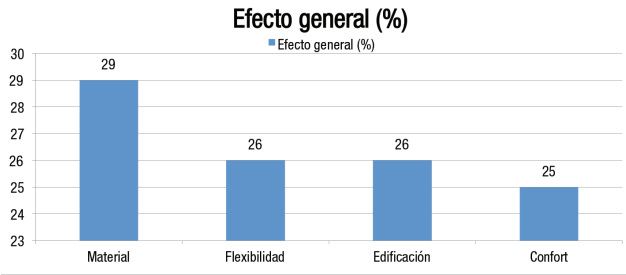
Unidades experimentales

| | |
|--|-------------|
| Resiliencia = (Flexibilidad x Material) | R = (A1 B1) |
| Resiliencia = (Confort x Material) | R = (A2 B1) |
| Resiliencia = (Flexibilidad x Edificación) | R = (A1 B2) |
| Resiliencia = (Confort x Edificación) | R = (A2 B2) |

Efectos Unidades Experimentales

| | |
|----|--|
| 1) | $\bar{X} (B1) = \frac{(A1 B1) + (A2 B1)}{2}$ |
| 2) | $\bar{X} (B2) = \frac{(A1 B2) + (A2 B2)}{2}$ |
| 3) | $\bar{X} (A1) = \frac{(A1 B1) + (A1 B2)}{2}$ |
| 4) | $\bar{X} (B1) = \frac{(A2 B1) + (A2 B2)}{2}$ |

Fuente: Cubillos (2015).



Se observó que, en general, cada una de las variables de estudio afecta el hábitat urbano de una manera similar. Se observó que, con respecto al efecto general de la relación entre las variables de estudio, cada uno afecta el hábitat urbano de una manera similar. Por ejemplo, el material de variables dependientes genera 29% de impacto, que ocupa la posición primaria, y la variable edificio genera 26% de impacto, ocupando la segunda. Del mismo modo, la variable flexibilidad produce 26% de impacto y la variable de confort genera 25%. Esto sugiere que las tres primeras variables deben ser altamente resilientes en un hábitat urbano (ver figura 33).

También se identificó que los efectos de estas cuatro variables pueden tener un impacto máximo del 35% y un mínimo del 15%. En cuanto a la variable de materiales, se observó que puede verse afectada por criterios de confort en un 8%. Del mismo modo, la comodidad se ve afectada por la variación de los factores determinantes de material en un 7%. Esto señaló una relación directa entre los criterios de diseño y selección de material. Este asunto es fundamental para determinar las propiedades elásticas de un material en el proceso de diseño y construcción de un hábitat urbano.

Uno puede ver que el efecto primario se refleja en el comportamiento de los factores de habitabilidad y eficiencia energética con respecto a la variable resiliencia. Los resultados del modelo muestran que un alto impacto ambiental, en un entorno urbano, afecta las condiciones de habitabilidad y eficiencia energética en un 50%.

Figura 33. Resultados efecto general de la fase cuantitativa.
Fuente: Cubillos (2015)

Mientras que si estos mismos impactos tienden a 0 las condiciones de vida y el aumento de la eficiencia energética se afectan un 50%. Por lo tanto, son directamente proporcionales (ver figura 34).

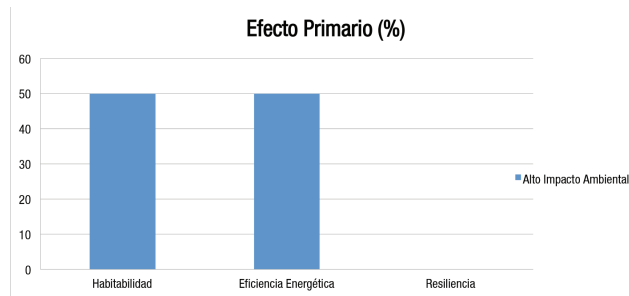


Figura 34. Resultados efecto primario de la fase cuantitativa.
Fuente: Cubillos (2015).

En cuanto a los efectos secundarios, el estudio encontró que la capacidad de flexibilidad de un entorno urbano ofrece un único impacto positivo. En este caso, el impacto positivo de flexibilidad variable fue del 5%, seguido de 4% de la variable material y finalmente 3% de la variable comodidad. Esto demuestra que la flexibilidad es de suma importancia cuando se garantiza que un entorno urbano será suficientemente elástico al enfrentar un cambio inesperado, como el clima extremo (ver figura 35).

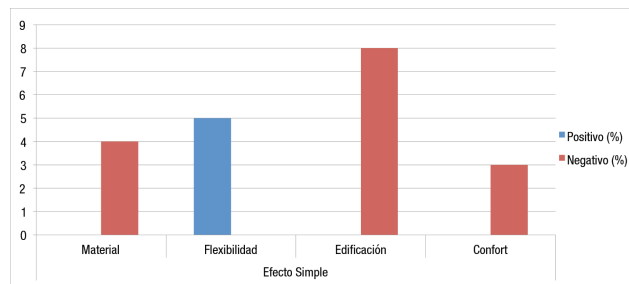


Figura 35. Resultados efecto simple de la fase cuantitativa.
Fuente: Cubillos (2015).

El modelo muestra que un alto impacto ambiental afecta la flexibilidad, el confort y la construcción de una edificación hasta en un 80% de impacto negativo; seguido del material con un 40% y el confort con un 30% de impacto negativo. En promedio, el interés individual de cada una de estas variables es del 15%. Esto demuestra una fuerte relación entre las variables al enfrentar acontecimientos inesperados. Sin embargo, se presenta un 50% de impacto positivo en el proceso de adaptación del hábitat urbano, lo que permite deducir que la flexibilidad es directamente proporcional a la resiliencia. Es decir, la capacidad de recuperación de un hábitat urbano depende de la culminación de varias acciones de flexibilidad, las cuales, juntas, responden al sistema afectado (ver figura 36).

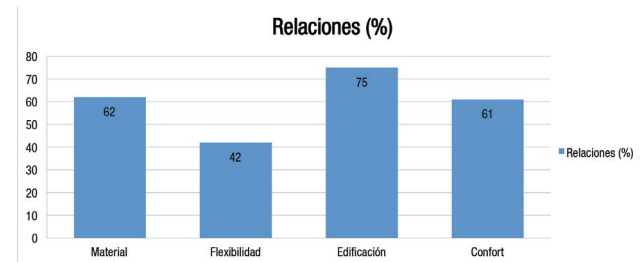


Figura 36. Relaciones entre las variables de estudio de la fase cuantitativa.
Fuente: Cubillos (2015).

Por último, el modelo mostró que las variables de eficiencia energética, en comparación con el elemento material de la resiliencia, afectan el diseño del edificio y esto, a su vez, afecta la comodidad y la flexibilidad de un hábitat urbano. Es decir, habrá una mayor necesidad de resiliencia, ya que el hábitat urbano puede no tener la capacidad de responder a los cambios repentinos.

Tabla 5. Modelo de simulación por MS Excel fase cuantitativa.

| Relaciones | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|-------------|-----------------|----------------|------------------------------------|
| B1 Promedio material | | | | | A1 Promedio flexibilidad | | | | |
| Flexibilidad A1 | Material B1 | Confort A2 | Material B1 | Relaciones $((a1\ b1)+(a2\ b1))/2$ | Flexibilidad A1 | Material B1 | Flexibilidad A1 | Edificación B2 | Relaciones $((a1\ b1)+(a2\ b1))/2$ |
| 4 | 2 | 6 | 5 | 20 | 4 | 1 | 9 | 1 | 7 |
| 6 | 3 | 8 | 2 | 18 | 9 | 4 | 7 | 9 | 53 |
| 9 | 3 | 7 | 2 | 18 | 7 | 0 | 8 | 2 | 7 |
| 4 | 2 | 4 | 9 | 19 | 7 | 4 | 5 | 7 | 35 |
| 8 | 4 | 6 | 8 | 40 | 4 | 3 | 2 | 2 | 7 |
| 2 | 9 | 3 | 6 | 18 | 2 | 2 | 1 | 8 | 5 |
| 3 | 4 | 8 | 3 | 17 | 1 | 3 | 7 | 1 | 4 |
| 9 | 3 | 9 | 0 | 16 | 9 | 2 | 3 | 4 | 16 |
| 8 | 7 | 5 | 9 | 53 | 7 | 2 | 5 | 8 | 27 |
| 6 | 2 | 5 | 3 | 12 | 9 | 9 | 4 | 6 | 50 |
| B2 Promedio edificio | | | | | A2 Promedio confort | | | | |
| Flexibilidad A1 | Edificación B2 | Confort A2 | Edificación B2 | Relaciones $((a1\ b2)+(a2\ b2))/2$ | Confort A2 | Material B1 | Confort A2 | Edificación B2 | Relaciones $((a1\ b2)+(a2\ b2))/2$ |
| 9 | 4 | 4 | 4 | 24 | 2 | 5 | 1 | 4 | 8 |
| 8 | 6 | 5 | 5 | 37 | 4 | 6 | 4 | 8 | 30 |
| 9 | 3 | 6 | 5 | 27 | 7 | 8 | 2 | 6 | 33 |
| 3 | 9 | 5 | 1 | 17 | 7 | 1 | 5 | 8 | 24 |
| 2 | 3 | 7 | 6 | 22 | 6 | 5 | 1 | 5 | 18 |
| 3 | 4 | 4 | 0 | 6 | 7 | 8 | 7 | 6 | 48 |
| 6 | 4 | 3 | 10 | 25 | 1 | 7 | 10 | 10 | 52 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 6 | 8 | 3 | 0 | 10 | 13 |
| 0 | 6 | 2 | 10 | 9 | 4 | 7 | 1 | 3 | 15 |
| 6 | 8 | 6 | 9 | 49 | 8 | 3 | 6 | 9 | 42 |

Fuente: Cubillos (2015).

Análisis de ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo

Para finalizar, se realizó un análisis de ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo. Para ello se escogieron aleatoriamente tres casas del barrio y se evaluaron según el tipo de materiales utilizados en la construcción. En las viviendas se analizaron los siguientes materiales: ladrillos, arcilla, vidrio plano y madera hendida. Se utilizó el algoritmo Europe EI 99 H/A. Se obtuvieron unos ecoindicadores ponderados y se analizó el ciclo de vida de los materiales. Todo el estudio se realizó con el programa SigmaPro (2015). En la gráfica 8 se muestra un ejemplo de los materiales introducidos en el programa.

Se estudió cómo afectaban los 4 materiales mencionados en tres aspectos: salud humana, calidad del ecosistema y recursos. Tal como se observa en la gráfica 9, la salud humana es la más afectada por el vidrio en comparación con los otros materiales en lis, en donde su impacto es menor. Con respecto a la calidad del ecosistema, el que más la afecta es la madera. Y, finalmente, respecto a los recursos, el de mayor impacto es el vidrio.

El estudio se hizo teniendo en cuenta 1 kg de los materiales mencionados. Se tomaron estos por muy utilizados en las viviendas del barrio Primero de Mayo. Las características de las bases de datos del programa fueron las mismas de los materiales. Se tuvieron en cuenta las siguientes variables: recursos de agua consumidos, ozono emitido, recursos energéticos consumidos, principales partículas emitidas en PM, metales pesados en el agua, recursos minerales utilizados, sustancia en el aire, un agente físico, químico o biológico potencialmente capaz de producir cáncer al exponerse a tejidos vivos.

También se tuvieron en cuenta los pesticidas en los sólidos, la tierra utilizada, los metales pesados en sólidos y

líquidos, el calentamiento global, agua contaminada y las sustancias radioactivas.

El análisis se puede observar en la figura 37. En ella se ve que el material que más impacta es el vidrio, después el bloque y finalmente la madera, destacando en el aspecto de calentamiento global y en los recursos consumidos. También se compararon nuevamente los cuatro materiales de forma porcentual, con respecto a los indicadores mencionados anteriormente, tal como se observa en la figura 40, destacando nuevamente que el mayor impacto es el del vidrio, prácticamente en todos los indicadores, exceptuando en la ecotoxicidad. El material que claramente menos impacta es la arcilla.

En la figura 40, el impacto de la madera es mayor en ecotoxicidad y en todo lo referente a agua. Los ladrillos aumentan en el aspecto de toxicidad humana y de residuos. En el resto de indicadores su impacto es en torno al 30%, mientras en vidrio está en torno al 100% comparativamente.

Ahora bien, la figura 41 continúa el análisis, pero cambiando los materiales a analizar. Los materiales tenidos en cuenta ahora, de acuerdo a lo observado en el barrio Primero de Mayo, son: ladrillo, arcilla, vidrio, polícarbonato granulado y hierro fundido. Tal como se indica en la primera parte de la gráfica con respecto a la salud humana, el que más afecta es el polícarbonato granulado, seguido del hierro fundido. En calidad del ecosistema es muy bajo en todos los materiales, pero en el gasto de recursos el más alto, sustancialmente, es el polícarbonato granulado.

Asimismo, en cuanto al impacto de los materiales, se observa, en la figura 38, que el de mayor impacto es el hierro fundido, seguido del polícarbonato granulado y el

vidrio. En los aspectos que hay mayor impacto son en los recursos, el consumo material, el calentamiento global y en metales pesados. En el caso del hierro fundido hay un cierto porcentaje que puede considerarse cancerígeno.

También, se realizó nuevamente el estudio comparativo en porcentaje entre los materiales, siendo el mayor en casi todos los ítems el hierro fundido y el polícarbonato granulado (ver figura 41). En algún aspecto puntual referente al ozono o al agua, el porcentaje del vidrio es alto. En los aspectos relacionados con el hombre el mayor es el del hierro fundido y los relacionados con el ozono, para la acidificación y el calentamiento global el material de mayor impacto es el polícarbonato granulado.

En el último estudio comparativo de los materiales (ver figura 39), se consideraron los siguientes: vidrio, perfiles de aluminio, bloques de concreto, teja de hormigón y arcilla. Materiales estudiados: vidrio, aluminio obtenido por extrusión, bloques de concreto, concreto utilizado en el tejado y arcilla. Se estudian tres indicadores: salud humana, calidad del ecosistema y recursos. El aluminio y el vidrio son los materiales que más impactan en los tres indicadores, el aluminio más en la salud y en los recursos, el vidrio en la calidad del ecosistema.

Y, finalmente, en el estudio comparativo porcentual entre los materiales, los que más afectan es el vidrio y el aluminio, tal como se observa en la figura 42. Por un lado, el aluminio afecta al calentamiento global, al ozono, a la acidez y a los aspectos humanos; el vidrio afecta al ozono, a los aspectos humanos, al agua, entre otros. También el concreto tiene cierto impacto en diferentes aspectos, como en humanos pero, en general, menor que los otros materiales mencionados.

SimaPro 8.0.4.30 Educational
Proyecto: Barrio 1° de Mayo-Bogotá 2016

Análisis de impacto

Fecha: 28/01/2016 Hora: 03:36:17 p.m.

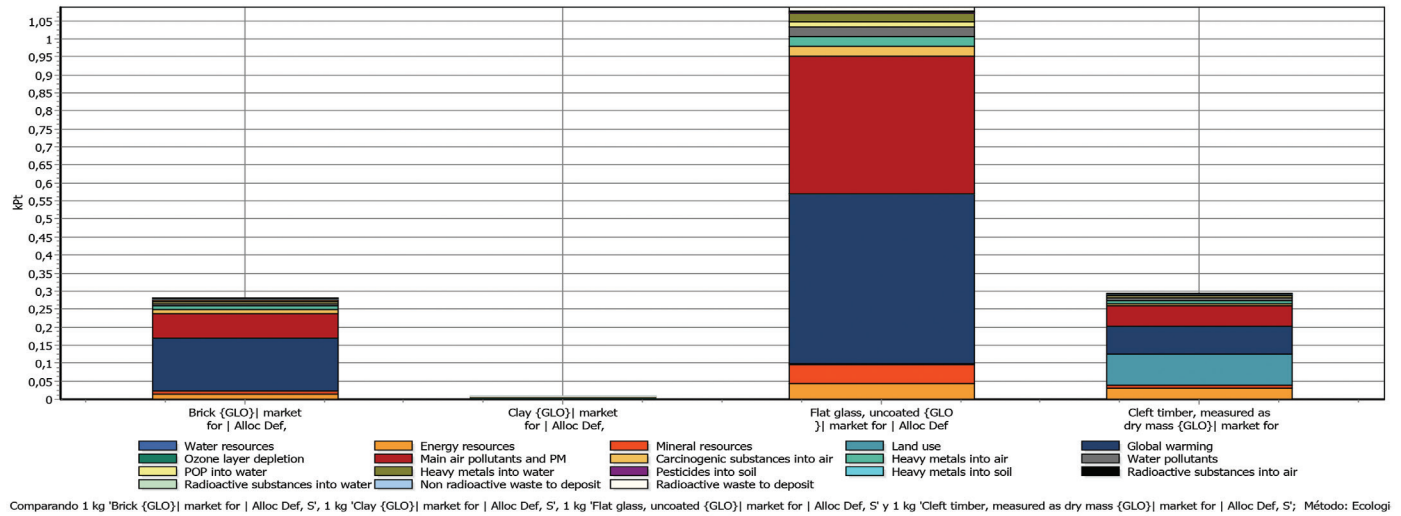


Figura 37. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.

SimaPro 8.0.4.30 Educational
Proyecto: Barrio 1° de Mayo-Bogotá 2016

Análisis de impacto

Fecha: 28/01/2016 Hora: 04:02:52 p.m.

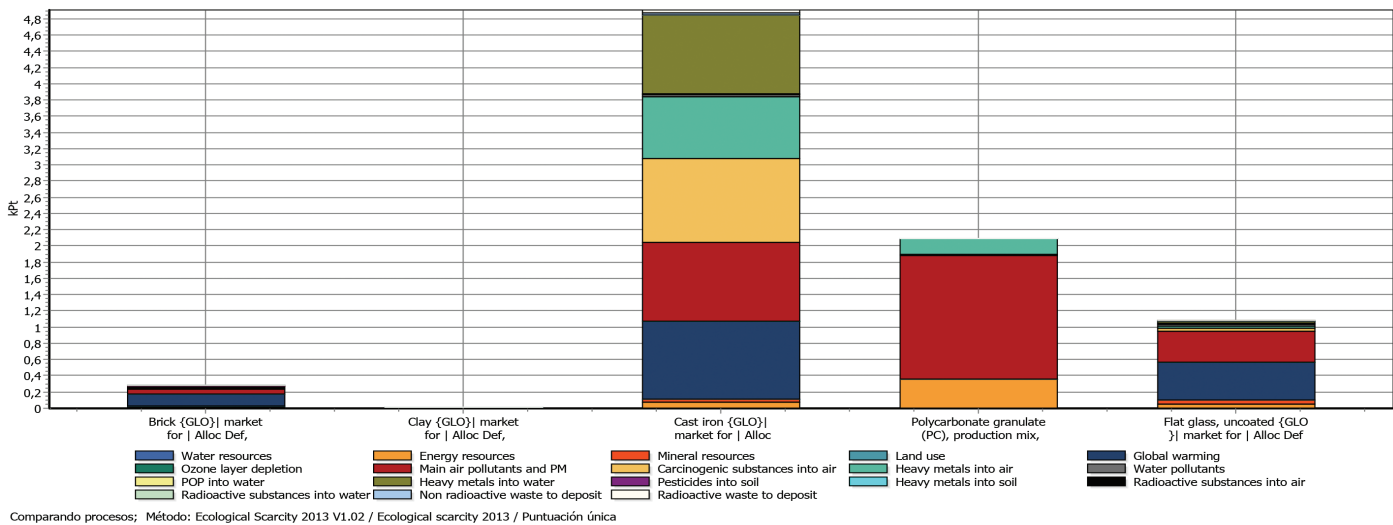


Figura 38. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.

SimaPro 8.0.4.30 Educational
Proyecto: Barrio 1° de Mayo-Bogotá 2016

Análisis de impacto

Fecha: 28/01/2016 Hora: 04:08:46 p.m.

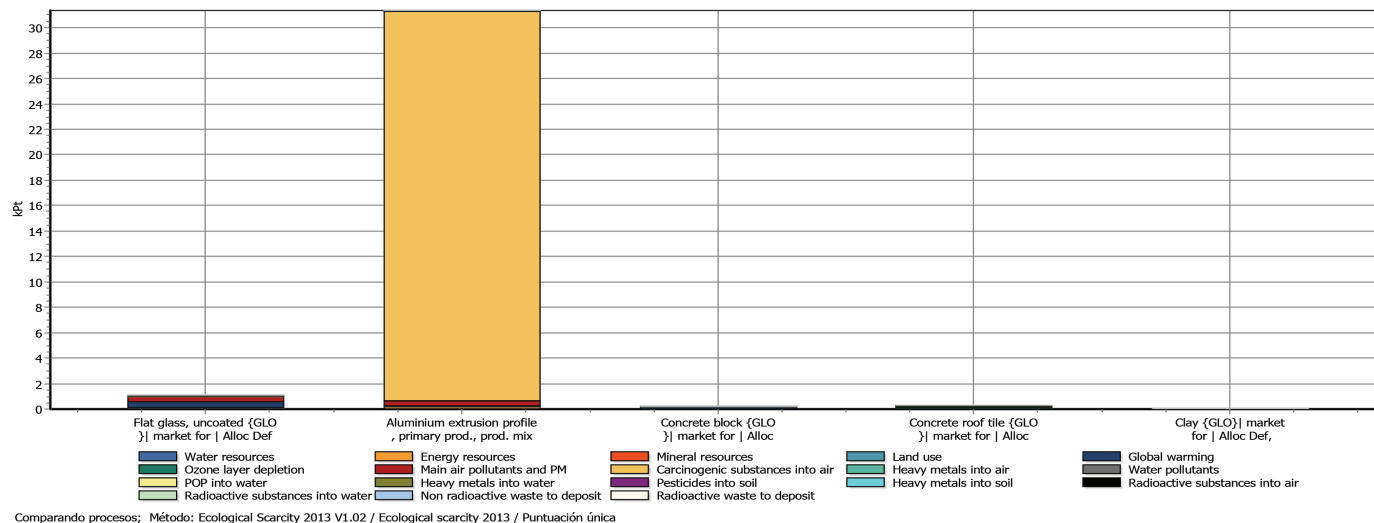


Figura 39. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.

SimaPro 8.0.4.30 Educational
Proyecto: Barrio 1° de Mayo-Bogotá 2016

Análisis de impacto

Fecha: 28/01/2016 Hora: 04:01:40 p.m.

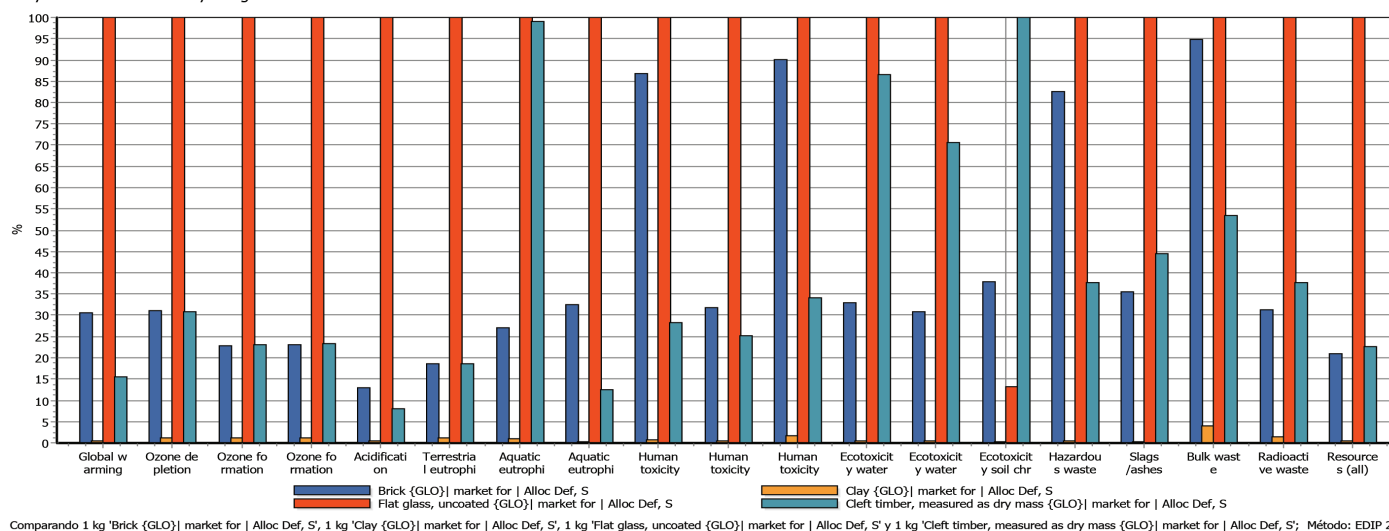


Figura 40. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.

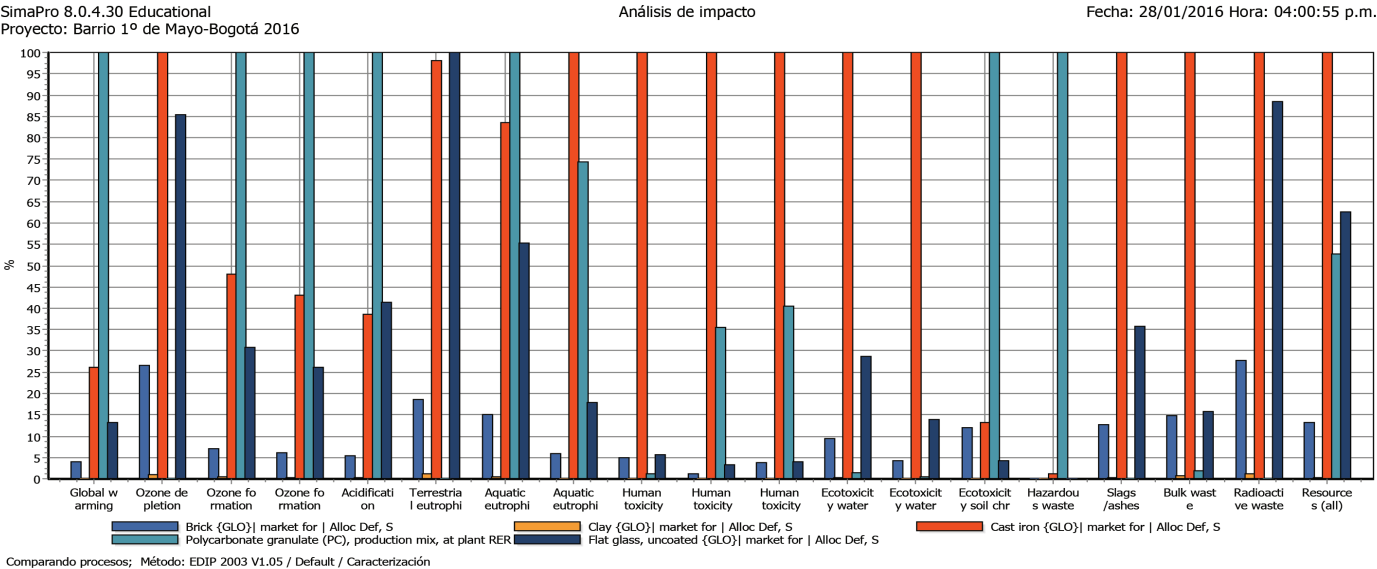


Figura 41. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.

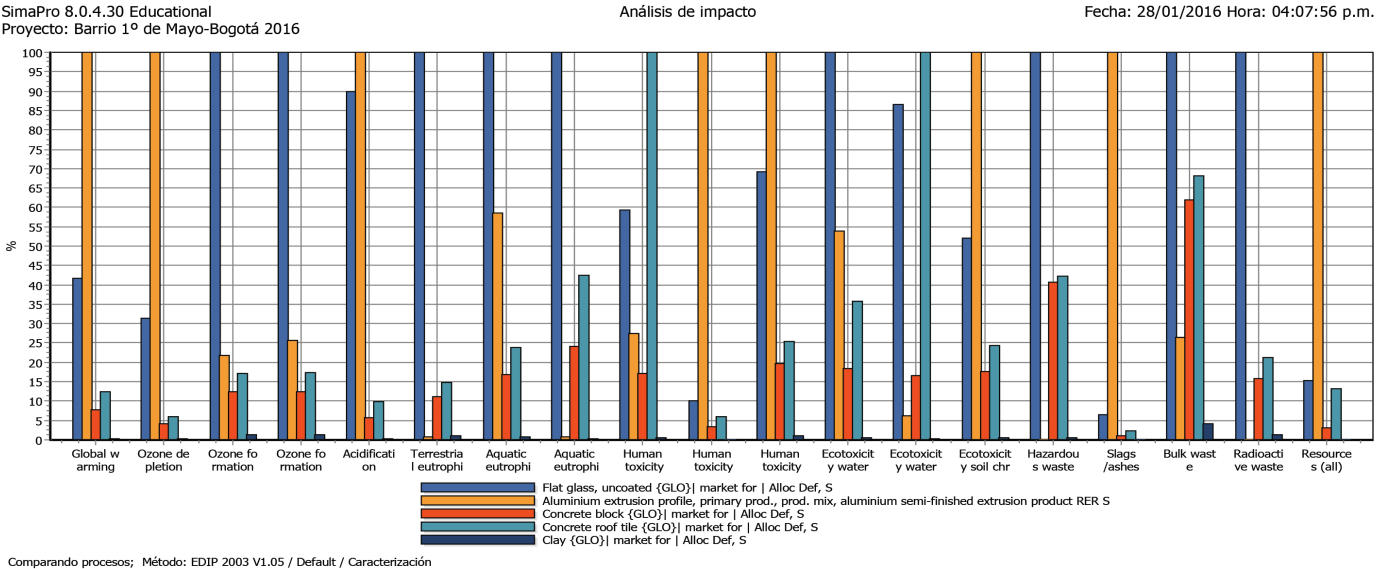


Figura 42. Análisis ciclo de vida de los materiales de las viviendas del barrio Primero de Mayo.



Para finalizar, los estudios identificaron la importancia de satisfacer la necesidad de resiliencia en las ciudades colombianas y, en consecuencia, los resultados proponen implementar un modelo que puede responder a esa necesidad, optimizando la sostenibilidad de un hábitat urbano. Los resultados del experimento también han evidenciado una mejor manera de definir el concepto de territorios resilientes.

El modelo determina el comportamiento de las diferentes variables que intervienen y, a su vez, la capacidad de adaptación y flexibilidad que tiene un hábitat urbano, es decir, la facilidad para reorganizarse y mantenerse en condiciones óptimas. Además, el modelo muestra una gran capacidad de regeneración, lo que permite un territorio resiliente que garantiza respuestas óptimas a los dramáticos cambios causados por el cambio climático.

Por ejemplo, no es condición suficiente que una vivienda esté construida con materiales que tienen una variable física de resiliencia alta para ser resiliente, pero sí es una condición necesaria. Por ello, se sugiere que, en la ficha técnica de un material de construcción, se tenga en cuenta la variable física de resiliencia. En general, puede haber

muchos materiales con variable física de resiliencia alta, pero con costos elevados; por lo tanto, se debe buscar un compromiso entre costo y resiliencia, lo cual es complejo y depende de muchos factores. Hay que tener en cuenta que no existe un material ideal, con resiliencia óptima, que se ajuste a todas las situaciones de construcción.

En general, las viviendas del barrio Primero de Mayo en Bogotá, desde el punto de resiliencia de los materiales, se pueden considerar bastante resilientes, ya que son robustas y pueden soportar fenómenos de cambio climático extremos pero, como contrapartida, son poco resilientes desde un punto de vista adaptativo, es decir, tienen una capacidad media de adaptación ya que son poco flexibles. No obstante, tienen un problema: no están pensadas ni diseñadas para una alta eficiencia energética; más bien todo lo contrario, su eficiencia energética es muy baja (valor en vatios promedio por área: W/m² en Bogotá).

Es clave, en cualquier diseño, una adecuada selección de materiales, para ello el diseñador debe conocer los nuevos materiales de construcción y sus principales características y propiedades, de tal forma que la selección sea la más adecuada. No se puede decir que existe un material único e ideal para la construcción de viviendas residenciales en Bogotá. Las variables climatológicas como temperatura, humedad relativa, dirección del viento y pluviosidad, entre otras, deben conocerse en detalle antes de realizar el diseño, ya que lo condicionarán sustancialmente, sobre todo si se busca un diseño resiliente.

Se constató la variación sustancial de variables climáticas, en los últimos 30 años, en la ciudad de Bogotá. Una eficiencia energética adecuada en los materiales y en el diseño es un factor determinante para ir hacia una

ciudad resiliente; sin embargo, en Bogotá, en el barrio Primero de Mayo, se constató una eficiencia energética baja. Se proponen para la ciudad procesos de rehabilitación de vivienda desde un punto de vista energético, con el fin de mejorar su eficiencia, sobre todo para disminuir el gasto de aire acondicionado y de luz. Se observó el deterioro sensible de algunos materiales en las viviendas del barrio, tales como humedades, grietas y biodeterio.

Se llegó a la conclusión de que no es suficiente el ahorro de energía en un territorio, más bien es necesario que el territorio tenga la capacidad de adaptarse continuamente, para permitir ajustes frente al cambio climático. Por lo tanto, la capacidad de recuperación se produce cuando diferentes componentes del territorio generan una reducción en los impactos y continúan operando, de manera óptima, sin grandes pérdidas.

El análisis del factor de resiliencia pretende garantizar la adaptación del consumo de energía mediante la identificación de patrones sociales, para entender la dinámica del territorio frente al cambio climático. Asimismo, se identificó que la estructura de un territorio debe ser flexible para garantizar un equilibrio adecuado entre la habitabilidad, la eficiencia energética y el territorio, en respuesta al cambio climático, por lo que, cuando se produce un evento extremo, se puede reorganizar y mantenerse las mismas funciones y estructuras.

La futura aplicación de este modelo va orientada al diseño de prototipos que permitirán el desarrollo de nuevas herramientas, para probar la habitabilidad de los edificios. Estos prototipos también pueden tener la capacidad de identificar las necesidades de los diferentes usuarios en un edificio, por medio de las variables de modelado y

simulación. Por ejemplo, las variables de cálculo bioclimáticas y la flexibilidad de vivienda pueden permitir la evaluación de los edificios y su impacto en el medio ambiente.

Debido a los efectos del cambio climático, se propone diseñar y construir viviendas en el futuro que tiendan a ser resilientes, siendo uno de los aspectos fundamentales la selección de materiales. La eficiencia energética y la sostenibilidad se consideran etapas previas hacia una construcción resiliente. En general, cuanto más resiliente es una vivienda mayor habitabilidad y durabilidad en el tiempo tendrá. En términos físicos e ingenieriles, la mejor manera de estudiar la resiliencia es a través de los materiales que conforman la vivienda, siendo la variable física resiliencia clave, pero no la única a tener en cuenta.



Referencias

- Altomonte, S. (march 2008). Climate Change and Architecture: Mitigation and Adaptation Strategies for a Sustainable Development. *Journal of sustainable development*, 1(1), 97-112.
- Applegath, C. (4-6 june 2013). Connecting Canadian Buildings To Natural Ecologies. In *Conference Proceedings Conference Proceedings, Stream 5: SB13*. Conference held in Vancouver, Canada.
- Aranda-Usón, A., Ferreira, G., López-Sabirón, A., Mainar-Toledo, M. & Zabalza, I. (february 2013). Phase Change Material Applications in Buildings: an Environmental Assessment for Some Spanish Climate Severities. *Science of the Total Environment*, 444, 16-25.
- Asdrubali, F., Baldassarri, C. & Fthenakis, V. (2013). Life Cycle Analysis in the Construction Sector: Guiding the Optimization of Conventional Italian Buildings. *Energy and Buildings*, 64, 73-89.
- Barco, C. (2013). *Documento técnico de soporte. Política del Sistema de Ciudades de Colombia*. Recuperado de: <http://www.urbanpro.co/wp-content/uploads/2017/04/Misi%C3%B3n-para-el-Fortalecimiento-del-Sistema-de-Ciudades-de-Colombia.pdf>
- Berardi, U. (october 2013). Clarifying the New Interpretations of the Concept of Sustainable Building. *Sustainable Cities and Society*, 8, 72-78.
- Birkmann, J., Bach, C. & Vollmer, M. (2012). Tools for Resilience Building and Adaptive Spatial Governance. *Raumforschung und Raumordnung*, 70 (Issue 4), 293-308. doi: 10.1007/s13147-012-0172-0
- Bogunovich, D. (2009). From Planning Sustainable Cities to Designing Resilient Urban Regions. *Sustainable Development and Planning IV*, 1, 87-96. Recuperado de: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SDP09/SDP09009FU1.pdf>
- Boyle, J., Harris, M., Bizikova, L., Parry, J., Hammill, A. & Dion, J. (2013). *Exploring Trends in Low-Carbon, Climate-Resilient Development*. Recuperado de: http://www.iisd.org/sites/default/files/publications/exploring_trends_low_climate.pdf
- Burleson, E. (november 2011). Energy Revolution and Disaster Response in the Face of Climate Change. *Villanova Environmental Law Journal*, 22(169): 101-119.
- Carter, J., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J. & Kazmierczak, A. (2015). Climate Change and the City: Building Capacity for Urban Adaptation. *Progress in Planning*, 95, 1-66. doi: 10.1016/j.progress.2013.08.001
- Casals-Tres, M., Arcas-Abella, J., Cuchí, A. & Altés-Arlan-dis, A. (2009). Habitability, the Scale of Sustainability. [PDF]. Recuperado de: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:653106/FULLTEXT01.pdf>
- Castleton, H., Stovinb, V., Beckc, S. & Davison, J. (2010). Green Roofs; Building Energy Savings and the Potential for Retrofit. *Energy and Buildings*, 42 (10), 1582-1591.

- Castro-Lacouture, D., Sefair, J., Flórez, L. & Medaglia, A. (june 2009). Optimization Model for the Selection of Materials Using a LEED-based Green Building Rating System in Colombia. *Building and Environment*, 44 (6), 1162-1170.
- Chaudhry, H., Calautit, J. & Hughes, B. (2015). Computational Analysis to Factor Wind into the Design of an Architectural Environment. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2015. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/234601>
- Colding, J. & Barthel, S. (february 2013). The Potential of “Urban Green Commons” in the Resilience Building of Cities. *Ecological Economics*, 86, 156-166.
- Comfort, L., Boin, A. & Demchak, C. (Ed.) (2010). *Designing Resilience: Preparing for Extreme Events*. Pittsburgh, EE.UU.: University of Pittsburgh Press.
- Cortés, C. y Cubillos, R. (24-28 de noviembre de 2014). Evaluación de la eficiencia a partir del análisis del factor de resiliencia en las edificaciones en Bogotá. En *Tercer Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y desarrollo Sustentable*. Congreso llevado a cabo en La Habana, Cuba.
- Costa, C. y Mora, C. (2010). *El ABC del cambio climático en Colombia*. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/documentos/211209_abc_del_cambio_climatico_en_colombia.pdf
- Cubillos, R. (2006). Vivienda social y flexibilidad en Bogotá. ¿Por qué los habitantes transforman el hábitat de los conjuntos residenciales? *Bitácora Urbano Territorial*, 10(1), 124-135.
- Cubillos, R. (2010). Sistema de gestión de información de proyectos de vivienda social (SGIPVIS). *Revista de Arquitectura*, 12(1), 90-101.
- Cubillos, R. (2015). Testing Habitability for Sustainable Building Design. *TEKA Journal-Polish Academy of Science Branch in Lublin*, 11(4), 116-124.
- Cubillos, R. (2-4 december 2015a). A Model of Energy Efficiency from the Analysis of Resilient Territories. In *ICEUBI2015-International Conference on Engineering. Engineering for Society*. Conference held in Covilha, Portugal.
- Cubillos, R. (2015b). Evaluación de la habitabilidad para el diseño de edificaciones resilientes y sostenibles. *Exkema*, 6(30), 72-75.
- Cubillos, R. y Rodríguez, C. (jul-dic 2013). Evaluación del factor de habitabilidad en las edificaciones sostenibles. *Revista nodo*, 8(15), 47-64.
- Dalsgaard, A. (2012). The Human Scale [Documentary]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=OrHgE556A3k>
- Dangana, Z., Pan, W. & Goodhew, S. (3-5 september 2012). Delivering Sustainable Buildings in Retail Construction. In *Annual Association of Researchers in Construction Management (ARCOM) Conference*. Conference held in Edinburgh, UK.
- Departamento Nacional de Planeación (2012). *Misión Sistema de Ciudades*. Bogotá, Colombia: Puntoaparte bookvertising.
- Dodman, D. (2009). Urban Form, Greenhouse Gas Emissions and Climate Vulnerability. In J.M. Guzmán, G. Martine, G. McGranahan, D. Schensul and C. Tacoli (Eds.), *Population Dynamics and Climate Change* (pp. 64-79). New York, EE.UU.: UNFPA.
- Dodoo, A., Gustavsson, L. y Sathre, R. (2012). Effect of Thermal Mass on Life Cycle Primary Energy Balances of a

- Concrete-and a Wood-frame Building. *Applied Energy*, 92, 462-472.
- Dutil, Y., Rousse, D. y Quesada, G. (december 2011). Sustainable Buildings: An Ever Evolving Target. *Sustainability*, 3(2), 443-464.
- Edwards, B. (2005). *Rough Guide to Sustainability*. London, U.K.: RIBA Enterprises Ltd.
- Eisenack, K., Moser, S., Hoffmann, E., Klein, R., Oberlack, C., Pechan, A., ... y Termeer, C. (2014). Explaining and Overcoming Barriers to Climate Change Adaptation. *Nature Climate Change*, 4(10), 867-872. doi: 10.1038/nclimate2350
- Escallón, C. & Villate, C. (jul-dic 2013). Código de construcción para Bogotá: evaluación y propuesta de actualización en el marco de la sostenibilidad. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 6(12), 248-259.
- Escallón, C. & Rodríguez, D. (2010). Las preguntas por la calidad de la vivienda: ¿quién las hace?, ¿quién las responde. *Dearq*, (6), 6-19.
- Ewing, B., Poblete, P., Chen, C. & Caycedo, P. (2010). *Colombia Sostenible. Banco Mundial*. Recuperado de: <http://documents.worldbank.org/curated/en/805761468243561235/pdf/701980ESW0SPAN-0cologica0de0Colombia.pdf>
- Franzoni, E. (2011). Materials Selection for Green Buildings: Which Tools for Engineers and Architects. *Procedia Engineering*, 21, 883-890.
- García, H., Montezuma, R., Jiménez, A., Launay, C., O'Riordan, E., Fedesarrollo,... Instituto para la Investigación y Debate sobre la Gobernanza (2013). *Ciudades y Cambio Climático en Colombia*. Recuperado de: http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/336/1/Repor_Octubre_2013_Fedesarrollo_Fichas_Diagnostico.pdf
- Gamboa, C. (2011). *Elementos de política para alcanzar ciudades sostenibles*. Bogotá, Colombia: Consejo Colombiano de Construcciones Sostenibles (CCCS).
- Gehl, J. & Svarre, B. (2013). *How to Study Public Life*. Washington D.C., EE.UU.: Island Press.
- Guinée, J. (Ed.) (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Netherlands.
- Gupta, R. (2014). Characterizing Material Properties of Cement-Stabilized Rammed Earth to Construct Sustainable Insulated Walls. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 60-68.
- Gustavsson, L., Joelsson, A. & Sathre, R. (february 2010). Life Cycle Primary Energy Use and Carbon Emission of an Eight-Storey Wood-Framed Apartment Building. *Energy and Buildings*, 42(2), 230-242.
- Hannus, M. (2009). *D4. 1 Vision for ICT Supported Energy Efficiency in Construction*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Alain_Zarli/publication/266217175_Vision_for_ICT_supported_Energy_Efficiency_in_Construction/links/54bcffe60cf-218d4a168673a.pdf
- Hardoy, J. & Velásquez, L. (april 2014). Re-Thinking "Bio-manizales": Addressing Climate Change Adaptation in Manizales, Colombia. *Environment and Urbanization*, 26(1), 53-68.
- Hunt, D., Rogers, C. & Jefferson, I. (2013). Scenarios Analysis Through a Futures Performance Framework. *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*, 166(Issue 5), 258-271. doi: 10.1680/ensu.12.00040

- IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio,... DNP (2012). *Algunas señales de Cambio Climático por medio de monitoreo de índices de extremos climáticos Stardex para la región de Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: PRICC.
- IDEAM, PNUD, (2014). *Estrategias regional de mitigación y adaptación al cambio climático para Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: IDEAM/PNUD.
- IDEAM, PNUD, (2014a). *Mitigación del Cambio Climático en la Región Capital. Medidas Priorizadas para Reducir las Emisiones de Efecto Invernadero*. Bogotá, Colombia: IDEAM/PNUD.
- IDEAM, PNUD, (2014b). *Vulnerabilidad de la Región Capital a los efectos del cambio climático. Opciones para la adaptación*. Bogotá, Colombia: IDEAM/PNUD.
- Jennings, B., Vugrin, E. y Belasich, D. (june 2013). Resilience Certification for Commercial Buildings: a Study of Stakeholder Perspectives. *Environment Systems and Decisions*, 33(Issue 2), 184-194.
- Lin, K., Levan, A. y Dossick, C. (july 2012). Teaching life-cycle thinking in construction materials and methods: evaluation of and deployment strategies for life-cycle assessment in construction engineering and management education. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 138 (Issue 3), 163-170.
- Keeffe, G. y McHugh, I. (2014). IDEAhaus: A Modular Approach to Climate Resilient UK Housing. *Buildings*, 4(4), 661-682. doi: 10.3390/buildings4040661
- Mahdavi, A. (1998). Steps to a General Theory of Habitability. *Human Ecology Review*, 5(1), 23-30.
- Mehdipoor, A., Dahlan, N., Berardi, U. y GhaffarianHoseini, M. (august 2013). Sustainable Energy Performances of Green Buildings: A Review of Current Theories, Implementations and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 1-17.
- Mlecnik, E. (2012). Defining Nearly Zero-Energy Housing in Belgium and the Netherlands. *Energy Efficiency*, 5(Issue 3), 411-431. doi: 10.1007/s12053-011-9138-2
- Mofidi, S., Moradi, A., Akhtarkavan, M. y Akhtarkavan, H. (23-25 february 2008). Assessing Challenges in Developing Sustainable Adaptation Strategies by Considering Climate Changes. In *The 3rd LASME/WSEAS International Conference on Energy & environment*. Conference held in Cambridge, UK.
- Muñoz, R. y Ochoa, M. (2011). *Investigación operativa*. México, D.F., México: Ediciones McGraw-Hill.
- Newsham, G., Mancini, S. y Birt, B. (2009). Do LEED-Certified Buildings Save Energy? Yes, but.... *Energy and Buildings*, 41(8), 897-905.
- Nijland, T., Adan, O., van Hees, R. y van Etten, B. (2009). Evaluation of the Effects of Expected Climate Change on the Durability of Building Materials with Suggestions for Adaptation. *Heron*, 54(1), 37-48.
- Nordby, A. y Shea, A. (october 2013). Building Materials in the Operational Phase. *Journal of Industrial Ecology*, 17(Issue 5), 763-776.
- ONU-UNHABITAT. (5-11 april 2014). For a Better Urban Future. Diálogo 5: Mejorando los niveles de resiliencia urbana. In *7º World Urban Forum. Urban Equity in Development. Cities For Life*. Conference held in Medellín, Colombia.
- Ortiz, O., Castells, F. y Sonnemann, G. (february 2010). Operational Energy in the Life Cycle of Residential Dwellings: The Experience of Spain and Colombia. *Applied Energy*, 87 (2), 673-680.

- Ozuna, A., Rivera, J., Vargas, H. y Guevara, J. (2011). *Sustainable Construction in Colombia: Main Actors and Implementation*. Recuperado de: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC22956.pdf
- Pacheco-Torgal, F. y Labrincha, J. (march 2013). The Future of Construction Materials Research and the Seventh UN Millennium Development Goal: A Few Insights. *Construction and Building Materials*, 40, 729-737.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2010). *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)*. Recuperado de: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Directiva_2010-31_UE_EE_en_edificios_Refundicion_d3ee0458.pdf
- Penagos, G. & González, A. (16-18 december 2014). Sustainable Water Management in Buildings, an Affordable Approach. Case Study: Terra Bio-Hotel Project, Medellín, Colombia. In *30th International Plea Conference, 2014*. Conference held in CEPT University, Ahmedabad, India.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. & Pout, C. (2008). A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*, 40(Issue 3), 394-398.
- Ramírez, A. (2002). La construcción sostenible. *Física y Sociedad*, (13), 30-33.
- Real Academia Española (2017). Resiliencia. Madrid, España: *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de: <http://dle.rae.es/?id=WA5onlw>
- Randolph, K. & Rider, A. (17-22 august 2014). Resilient Buildings for a Round Planet: Mitigating Operational Risks with Adaptation Strategies. In *2014 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Conference held in Pacific Grove, CA, EE.UU.
- Raut, S., Ralegaonkar, R. & Mandavgane, S. (october 2011). Development of Sustainable Construction Material Using Industrial and Agricultural Solid Waste: A Review of Waste-Create Bricks. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4037-4042.
- RIBA (4 nov. 2009). Dialogues: Jan Gehl. In *The International Dialogues: Architecture and Climate Change The Sustainable City*. Event held in London, UK.
- Ríos, D., Ríos, S. & Martín, J. (2009). *Simulación. Método y aplicaciones*. México D.F., México: Alfaomega/Ra-Ma Editorial.
- Samad, T., Panman, A., Rodríguez, A. & Lozano-Gracia, N. (2015). *Sistema de ciudades*. Recuperado de: <https://www.dnp.gov.co/programas/vivienda-agua-y-desarrollo-urbano/desarrollo-urbano/Paginas/sistema-de-ciudades---libro.aspx>
- Schulze, P. (Ed.) (1996). *Engineering within Ecological Constraints*. Washington D.C., EE.UU.: The National Academies Press.
- Sikdar, S. (2003). Sustainable Development and Sustainability Metrics. *AICHE Journal*, 49(Issue 8), 1928-1932. Recuperado de: <http://doi.org/10.1002/aic.690490802>
- Soares, N., Costa, J., Gaspar, A. & Santos, P. (april 2013). Review of Passive Pcm Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Towards Buildings' Energy Efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82-103.
- Spiegel, R. y Meadows, D. (2010). *Green Building Materials: a Guide to Product Selection and Specification*. Nueva Jersey, EE.UU.: John Wiley & Sons.

- Spitzmiller, M., Mahendra, S. & Damoiseaux, R. (2013). Safety Issues Relating to Nanomaterials for Construction Applications. In F. Pacheco-Torgal, M.V. Diamanti, A. Nazari and C. Goran-Granqvist (Eds.), *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction. Materials, Processes and Applications* (pp. 127-158). Cambridge, EE.UU.: Woodhead Publishing.
- Stillwell, K., Reis, E., Mayes, R. & Von Berg, E. (21-25 July 2014). Resilient Buildings: From Concept to Reality. In *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Conference held in Anchorage, Alaska, USA.
- Stockholm Resilience Centre (2014). What is Resilience? An Introduction to a Popular Yet Often Missunderstood Concept. Stockholm University: *Stockholm Resilience Centre*. Recuperado de: <http://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2015-02-19-what-is-resilience.html>
- Susilorini, M., Dewi, K, y Wibowo, T. (february 2005). The Performance of Early-Age Concrete with Seawater Curing. *Journal of Coastal Development*, 8 (2), 89-95.
- Tatari, O. y Kucukvar, M. (may 2011). Cost Premium Prediction of Certified Green Buildings: A Neural Network Approach. *Building and Environment*, 46(5), 1081-1086.
- Thiel, C., Campion, N., Landis, A., Jones, A., Schaefer, L. y Liec, M. (february 2013). A Materials Life Cycle Assessment of a Net-Zero Energy Building. *Energies*, 6 (2), 1125-1141.
- Tidblad, J., Kucera, V., Ferm, M., Kreislova, K., Brüggerhoff, S., Doytchinov, S. ..., Karmanova, N. (2012). Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage: ICP Materials Celebrates 25 Years of Research. *International Journal of Corrosion*, 2012.
- Trebilcock, M., Ford, B. y Wilson, R. (september 2006). Integration of Sustainability in the Design Process of Contemporary Architectural Practice. *Energy*, 6-8.
- UNISDR (2012). *Cómo desarrollar ciudades más resilientes. Un Manual para líderes de los gobiernos locales*. Recuperado de: http://www.unisdr.org/files/26462_manualparalideresdelosgobiernosloca.pdf
- Velasco, R. y Robles, D. (21-24 september 2011). Eco-Envolventes: A Parametric Design Approach to Generate and Evaluate Façade Configurations for Hot and Humid Climates. In *29th eCAADe Conference Proceedings*. Conference held in Ljubljana, Slovenia.
- Welsh-Huggins, S. y Liel, A. (28 september-1 october 2014). Integrating Green and Resilient Building Design for Enhanced Disaster Recovery. In *3rd International Conference on Urban Disaster Reduction, Earthquake Engineering Research*. Conference held in Boulder, EE.UU.
- Wilby, R. (march 2007). A Review of Climate Change Impacts on the Built Environment. *Built Environment*, 33(1), 31-45.
- Yuan, L. (2012). Building Energy Efficiency and the Use of Raw Materials. *Physics Procedia*, 24(Part C), 2318-2321.
- Zabalza, I., Valero, A. y Aranda-Usón, A. (may 2011). Life Cycle Assessment of Building Materials: Comparative Analysis of Energy and Environmental Impacts and Evaluation of the Eco-Efficiency Improvement Potential. *Building and Environment*, 46 (5), 1133-1140.



- Aaditya, G., & Mani, M. (2013). Climate-Responsive Integrability of Building-Integrated Photovoltaics. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(4), 271-281. Recuperado de: <http://doi.org/10.1093/ijlct/cts039>
- Acevedo, H., Vásquez, A. & Ramírez, D. (feb-may de 2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 15(1), 105-117.
- Aguirre, M. (2012). La construcción sostenible en Colombia, presente y futuro. *Informe Económico*, (40), 1-7. Recuperado de: http://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/Informe%20Econ%C3%B3mico%20Oct2012-No%2040.pdf
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2013). *Decreto 364 de 26 de agosto de 2013*. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/POT_2020/POT/Decreto-364.pdf
- Alshebani, M. & Wedawatta, G. (2014). Making the Construction Industry Resilient to Extreme Weather: Lessons from Construction in Hot Weather Conditions. *Procedia Economics and Finance*, 18, 635-642. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00985-X](http://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00985-X)
- Alvarez, P., McElwain, B., Thesing, L., Edalath, S., Kukreti, A. & Cohen, K. (2014). PD and Fuzzy Logic Control for Earthquake Resilient Structures. *Computer Applications in Engineering Education*, 22(Issue 1), 142-152. Recuperado de: <http://doi.org/10.1002/cae.20540>
- Ángel, L., Ramírez, A. & Domínguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 173-183. Recuperado de: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_34/131/173-183.pdf
- Arcas-Abella, J., Pagès, A. & Casals, M. (28-30 abril de 2010). Habitabilidad, la otra clave de la edificación sostenible. En *Congreso Regional Internacional Sustainable Building. "Construcción, revitalización y rehabilitación sostenible de barrios: una escala urgente e imprescindible"*. Congreso llevado a cabo en Madrid, España.
- Arévalo, D. (2014). *Implementación del sistema de certificación LEED en Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Arup, RPA & Siemens (2013). *Toolkit for Resilient Cities. Infrastructure, Technology and Urban Planning*. Recuperado de: <https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/global/company/topic-areas/intelligent-infrastructure/resilience/toolkit-for-resilient-cities.pdf>
- Arup and Engineers Without Borders-UK (2012). *Visions of a Resilient City*. Recuperado de: http://publications.arup.com/~media/Publications/Files/Publications/V/Resilient_Cities_Scoping_Study.ashx

- Aylett, A. (2015). Institutionalizing the Urban Governance of Climate Change Adaptation: Results of an International Survey. *Urban Climate*, 14(Part 1), 4-16. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.06.005>
- Bäcker, A. (2009). *Guía de estrategias y tecnologías sostenibles*. Filadelfia, EE.UU.: DP.
- Baker, J. (Ed.) (2012). *Climate Change, Disaster Risk, and the Urban Poor: Cities Building Resilience for a Changing World*. Washington D.C., EE.UU.: The World Bank.
- Banco Mundial Colombia (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá, Colombia: Equilátero.
- Barrios, G., Elías, P., Huelsz, G. y Rojas, J. (octubre de 2010). Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. *Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del desierto*, 3(3), 69-84.
- Benjumea, L. y García, M. (2-3 agosto de 2011). El síndrome de edificio enfermo como resultado de una ineficiente e inadecuada gestión ambiental y ocupacional. In *Ninth Latin American and Caribbean Conference (LACCEI 2011)*. Conference held in Medellín, Colombia.
- Bettencourt, S., Ebinger, J., Fay, M., Ghesquiere, F., Gitay, H., Krausing, J.,... Simpson, A. (2013). *Building Resilience. Integrating Climate and Disaster Risk into Development*. Washington, D.C., EE.UU.: The World Bank Group Experience.
- Blackburn, S. y Johnson, C. (2012). *Making Cities Resilient Report 2012*. Recuperado de: http://www.unisdr.org/files/28240_rcreport.pdf
- Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for Urban Physics: Importance, Scales, Possibilities, Limitations and Ten Tips and Tricks Towards Accurate and Reliable Simulations. *Building and Environment*, 91, 219-245. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- BRE Global Ltd (2006). *Ecohomes 2006 - The Environmental Rating for Homes*. Recuperado de: [http://www.breeam.org/filelibrary/Technical Manuals/EcoHomes_2006_Guidance_v1.2_-_April_2006.pdf](http://www.breeam.org/filelibrary/Technical%20Manuals/EcoHomes_2006_Guidance_v1.2_-_April_2006.pdf)
- BRE Global Ltd (2010). *Scheme Document: SD 5055*. Recuperado de: http://www.hrsservices.co.uk/wp-content/uploads/2016/07/SD5055_4.0_BREEAM_Offices_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2010a). *Scheme Document SD 5064. BREEAM Multi-Residential 2008*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/SD5064_2_0_BREEAM_Multi-Residential_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2010b). *Scheme Document SD 5050*. Recuperado de: http://www.hrsservices.co.uk/wp-content/uploads/2016/07/SD5050_4.0_BREEAM_Courts_20081.pdf
- BRE Global Ltd (2010c). *Scheme Document SD 5068*. Recuperado de: http://www.hrsservices.co.uk/wp-content/uploads/2016/07/SD5068_1_0_BREEAM_Datacentres_20101.pdf
- BRE Global Ltd (2011). *New Construction - Non Domestic Buildings. Technical Manual SD-5073-2.0:2011*. Recuperado de: http://www.breeam.com/breeamGeneralPrint/breeam_non_dom_manual_3_0.pdf

- BRE Global Ltd (2012). *BREEAM Communities. Technical Manual SD-202-0.1:2012*. Recuperado de: http://www.breeam.com/bre_PrintOutput/BREEAM_Communities_0_1.pdf
- BRE Global Ltd (2012a). *SD 5066A: ISSUE 1.1. BREEAM Europe Commercial 2009 Assessor Manual*. Recuperado de: <http://www.heatracing.co.uk/upload/BREEAM-WAT-04-Sanitary-Supply-Shut-Off-System---Europe-Commercial-2009-Assessor-Manual.pdf>
- BRE Global Ltd (2012b). *Scheme Document SD 5051*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/SD5051_4_1_BREEAM_Education_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2012c). *Scheme Document SD 5052*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/SD5052_4_1_BREEAM_Industrial_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2012d). *Scheme Document SD 5053*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/SD5053_4_1_BREEAM_Healthcare_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2012e). *Scheme Document SD 5054*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/technical%20manuals/sd5054_4_1_breeam_prisons_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2012f). *Scheme Document SD 5056*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/Technical%20Manuals/SD5056_4_1_BREEAM_Retail_2008.pdf
- BRE Global Ltd (2014). *BREEAM UK New Construction. Non-Domestic Buildings. Technical Manual SD5076: 01 (DRAFT)-2014*. Recuperado de: http://www.breeam.com/filelibrary/BREEAM%20UK%20NC%202014%20Resources/SD5076_DRAFT_BREEAM_UK_New_Construction_2014_Technical_Manual_ISSUE_0.1.pdf
- Brown, S., Pryke, S. & Sivyer, E. (7-8 september 2006). CO-BRA 2006: The Construction and Building Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors. In *Proceedings of the Annual Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors*. Conference held in London, UK.
- Brugmann, J. (2011). *Financing the Resilient City: A Demand Driven Approach to Development, Disaster Risk Reduction, and Climate Adaptation*. Bonn, Germany: Local Governments for Sustainability - ICLEI.
- Bruijn, H. de, Bruijne, M. de & Heuvelhof, E. ten (2015). The Politics of Resilience in the Dutch “Room for the River”-Project. *Procedia Computer Science*, 44, 659-668. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.070>
- Carrizosa, J. (2012). *Análisis de las principales dinámicas regionales asociadas a la variabilidad y al cambio climático en la Región Capital. Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital*. Bogotá, Colombia: PRICC.
- Carrizosa, J., Guhl, E. & Rodríguez, M. (2013). *Construcción de territorios resilientes bajo el escenario de cambio climático en la “Región Capital” (Bogotá-Cundinamarca) en el marco del PRICC*. Bogotá D.C., Colombia: fna.
- Castán Broto, V. & Bulkeley, H. (2013). A Survey of Urban Climate Change Experiments in 100 Cities. *Global Environmental Change*, 23(Issue 1), 92-102. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.005>

- Cerni, G. & Colagrande, S. (2012). Resilient Modulus of Recycled Aggregates Obtained by Means of Dynamic Tests in a Triaxial Apparatus. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 475-484. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.898>
- Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental, Fundación Conama y Observatorio de la Sostenibilidad en España (2009). *Cambio Global en España 2020/50: Programa Ciudades. Hacia un pacto de las ciudades españolas ante el cambio global*. Recuperado de: <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0531454.pdf>
- Chase-Dunn, C. y Jorgenson, A. (2009). *Systems of Cities*. Recuperado de: <http://www.irows.ucr.edu/andrew/papers/citysys.doc>
- Chelleri, L. (2012). From the “Resilient City” to Urban Resilience. A Review Essay on Understanding and Integrating the Resilience Perspective for Urban Systems. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 582, 287-306.
- Clark, G., Evans, G. y Nemecek, S. (2010). *Resilient Cities: Surviving in a New World. A ULI Urban Investment Network Report*. Washington D.C., EE.UU.: Urban Land Institute.
- Committee on Understanding and Monitoring Abrupt Climate Change and its Impacts and Board on Atmospheric Sciences and Climate Division on Earth and Life Studies (2013). *Abrupt Impacts of Climate Change: Anticipating Surprises*. Recuperado de: https://origins.asu.edu/sites/default/files/nrc_abrupt_climate_change-extinctions_pp109-125_.pdf
- Concejo de Bogotá (2008). Acuerdo 323 de 2008 Consejo de Bogotá D.C. Bogotá D.C.: *Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.* Recuperado de: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=32766>
- Conroy, C. (1987). Our Common Future. *The Geographical Journal*, 154(1), 116. Recuperado de: <http://doi.org/10.2307/633499>
- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (26), 74-80.
- Cuello, C. y Durvin, P. (2010). Desarrollo sostenible y Filosofía de la Tecnología. España, Sala de Lectura CTS+I: *Organización de Estados Iberoamericanos*. Recuperado de: <http://www.oei.es/historico/salactsi/tef02.htm>
- Degtyar, E., Mlynarczyk, B., Fratzl, P. y Harrington, M. (2015). Recombinant Engineering of Reversible Cross-Links into a Resilient Biopolymer. *Polymer*, 69, 255-263. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.03.030>
- Dewidar, K., Mohamed, N. y Ashour, Y. (2002). Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems. In *SB13 Dubai*. Conference held in Dubai, United Arab Emirates.
- Diagne, M., Tinjum, J. y Nokkaew, K. (2015). The Effects of Recycled Clay Brick Content on the Engineering Properties, Weathering Durability, and Resilient Modulus of Recycled Concrete Aggregate. *Transportation Geotechnics*, 3, 15-23. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.12.003>
- Dixon, T. (2012). *Hotting Up? An Analysis of Low Carbon Plans and Strategies for UK Cities Volume 1: Main Findings*. Recuperado de: <https://www.2degreesnetwork.com/groups/2degrees-community/resources/which-uks-leading-cities-cutting-emissions/attachments/5496/>

- Downing, T. y Patwardhan, A. (2005). Assessing Vulnerability for Climate Adaptation. In E. Spanger-Siegfried and B Lim (Eds.), *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures* (pp. 67-90). Cambridge, EE.UU.: The Press Syndicate Of The University Of Cambridge.
- Du Plessis, C. (2007). A Strategic Framework for Sustainable Construction in Developing Countries. *Construction Management and Economics*, 25(Issue 1), 67-76. Recuperado de: <http://doi.org/10.1080/01446190600601313>
- Dubbeling, M., Campbell, M. C., Hoekstra, F. & Veenhuizen, R. van. (june 2009). Building Resilient Cities. *Urban Agriculture Magazine*, (22), 3-11.
- Economist Intelligence Unit (s.f.). *Latin American Green City Index*. Recuperado de: https://www.siemens.com/entry/cc/features/greencityindex_international/all/en/pdf/report_latam_en.pdf
- Elliott, R. (2002). Hermeneutic Single-Case Efficacy Design. *Psychotherapy Research*, 12(Issue 1), 1-21. doi: 10.1080/713869614
- Fawzy, D. & Arslan, G. (2015). Development of Building Damage Functions for Big Earthquakes in Turkey. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2290-2297. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.179>
- Fiksel, J. (2003). Designing Resilient, Sustainable Systems. *Environmental Science and Technology*, 37(23), 5330-5339. Recuperado de: <http://doi.org/10.1021/es0344819>
- Fiksel, J., Eason, T. & Frederickson, H. (2012). *A Framework for Sustainability Indicators at EPA*. Whashington D.C., EE.UU.: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency.
- Fisher, J., Chmutina, K. & Bosher, L. (2015). Building in Resilience: Long-term Considerations in the Design and Production of Resilient Buildings in Israel. In A. J. Masys (Ed.), *Disaster Management: Enabling Resilience* (pp. 65-90). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Froese, T., Aranda-Mena, G., Chevez, A. & Crawford, J. (10-13 june 2008). Structuring the Business Case for Building Information Models. In *Annual Conference Canadian Society for Civil Engineering*. Conference held in Quebec, Canada.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid & Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid (2011). *Guía del estándar PassivHaus: edificios de consumo energético casi nulo*. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Estandar-Passivhaus-fenercom-2011.pdf>
- García, M., Pineros, A., Bernal, F. & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.
- Ghadi, Y., Rasul, M. & Khan, M. (2014). Potential of Saving Energy Using Advanced Fuzzy Logic Controllers in Smart Buildings in Subtropical Climates in Australia. *Energy Procedia*, 61, 290-293. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1110>
- Gordillo, F., Hernández, N. & Ortega, J. (2010). *Pautas para una construcción sostenible en colombia. Bogotá-Cali-Medellín*. Recuperado de: http://unicolmayor.edu.co/recursos_user/portal/rec/arc_3963.pdf
- Granero, A. & García, R. (25-27 de septiembre de 2013). El diseño de las envolvente arquitectónica, la reglamentación y su influencia en la eficiencia energética. En

Encuentro Latinoamericano de uso racional y eficiente de la energía - ELUREE-2013. Encuentro llevado a cabo en Buenos Aires, Argentina.

Hadiwattege, C., Fernando, N. & Senaratne, S. (14-15 june 2013). Role of Academic Research in Sustainable Construction Practice. In *The second World Construction Symposium 2013*. Symposium held in Colombo, Sri Lanka.

Hannus, M., Samad, A. & Zatl, Z. (2010). *ICT Supported Energy Efficiency in Construction*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/docs/sb_publications/reeb_ee_construction.pdf

Huedo, P. y López-Mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. *Informes de la Construcción*, 65(529), 77-88. Recuperado de: <http://doi.org/10.3989/ic.11.048>

Hui, S. (2001). Low Energy Building Design in High Density Urban Cities. *Renewable Energy*, 24(Issues 3-4), 627-640. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00049-0](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00049-0)

IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, ... DNP (26-28 julio de 2011). Plan Regional Integral de Cambio Climático Ciudades y Cambio Climático. En *Ciudades y Cambio Climático, Seminario Internacional*. Seminario llevado a cabo en Bogotá, Colombia.

IDEAM, PNUD, (2012a). *Sectores prioritarios y tecnologías disponibles para identificar e implementar medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en la Región Capital*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2012b). *Inventario de emisiones de gases efecto invernadero para la región Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2012c). *Gestión del cambio climático con enfoque territorial en la Región Capital. Apoyo al fortalecimiento institucional y a los tomadores de decisiones*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2014). *Compilación y análisis de información sobre registros de eventos de emergencia y desastre asociados al clima en la Región Capital 1980-2010*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2014a). *Identificación de medidas y formulación de proyectos de mitigación y adaptación a la variabilidad y al cambio climático en la Región Capital Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2014b). *Señales de Cambio Climático por Análisis de Extremos Climáticos*. Bogotá, Colombia: PRICC.

IDEAM, PNUD, (2014c). *Los Fenómenos El Niño y La Niña en Bogotá-Cundinamarca (1951-2012). Elementos para la Acción Institucional*. Bogotá, Colombia: PRICC.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2014). *Incorporación de la gestión adaptativa de los riesgos hidrológicos en el ordenamiento territorial*. Bogotá, Colombia: IDEAM/PNUD.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2014). *Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgo hidrológicos en el ordenamiento territorial municipal*. Bogotá, Colombia: IDEAM/PNUD.

- Jardín Botánico (2013). Generando Ciudades Resilientes. *Flora Capital*, (13), 40.
- Jha, A., Miner, T. y Stanton-Geddes, Z. (2012). *Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice*. Recuperado de: <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-0-8213-8865-5>
- Kallaos, J., Mainguy, G. y Wyckmans, A. (2014). Considering Resilience Steps Towards an Assessment Framework. *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 7(1), 5-28.
- Kannamma, D. & Meenatchi, S. (16-18 december 2014). Design Best Practice Methods To Minimize the Impact of Building Materials on Urban Microclimate. In *30th International Plea Conference*. Conference held in CEPT University, Ahmedabad, India.
- Klein, R., Nicholls, R. & Thomalla, F. (2003). Resilience to Natural Hazards: How Useful is this Concept? *Environmental Hazards*, 5(Issue 1), 35-45. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001>
- Knudstrup, M.-A., Ring Hansen, H. & Brunsgaard, C. (2009). Approaches to the Design of sustainable Housing with Low CO₂ Emission in Denmark. *Renewable Energy*, 34(Issue 9), 2007-2015. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.002>
- Kristian, R. (2011). *Código de construcción sostenible promoviendo la Eficiencia Energética y Ahorro de agua en las edificaciones*. Recuperado de: <http://www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/2%20KRISTIAN%20RADA.pdf>
- Krumwiede, K. & Dallessio, T. (2012). Rethinking Where, Why and How We Build. *Landscapes Paysages Journal*, 16(4), 26-29.
- Kuittinen, M., Ludvig, A. & Weiss, G. (Eds.) (2013). *Wood in Carbon Efficient Construction: Tools, Methods and Applications*. Brussels, Belgium: CEI-Bois.
- Kuroiwa, J. (2014). Peru Sustainable (Resilient) Cities Programme 1998-2012. Its Application 2014-2021. *Procedia Economics and Finance*, 18, 408-415. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00957-5](http://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00957-5)
- Kuznecova, T., Romagnoli, F. y Rochas, C. (2014). Energy Metabolism for Resilient Urban Environment: A Methodological Approach. *Procedia Economics and Finance*, 18, 780-788. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)01002-8](http://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)01002-8)
- Lampis, A. (2013). Cities and Climate Change Challenges: Institutions, Policy Style and Adaptation Capacity in Bogotá? *International Journal of Urban and Regional Research*, 37(Issue 6), 1879-1901. Recuperado de: <http://doi.org/10.1111/1468-2427.12034>
- Larson, L., Rajkovich, N., Leighton, C., McCoy, K., Calhoun, K., Mallen, E.,...Henriquez, J. (2011). *Green Building and Climate Resilience: Understanding Impacts and Preparing for Changing Conditions*. Ann Arbor, EE.UU.: University of Michigan.
- Leach, M., Rockström, J., Raskin, P., Scoones, I., Stirling, A., Smith, A., ... Olsson, P. (2012). Transforming Innovation for Sustainability. *Ecology and Society*, 17(Issue 2), 11. Recuperado de: <http://doi.org/org/10.5751/ES-04933-170211>
- Lee, J.-Y. & Kim, J.-M. (2014). Deflection of Resilient Materials for Reduction of Floor Impact Sound. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-11. Recuperado de: <http://doi.org/10.1155/2014/612608>
- Lehmann, S. (2007). What is Green Urbanism ? Holistic Principles to Transform Cities for Sustainability. In

- Juan Blanco and Houshang Kheradmand (Eds.), *Climate Change-Research and Technology for Adaptation and Mitigation* (pp. 243-266). Rijeka, Croatia: InTech.
- Lewandowski, C. (2015). *The Effects of Brief Mindfulness Intervention on Acute Pain Experience: An Examination of Individual Difference*. Carbondale, EE.UU.: Southern Illinois University.
- Lin, B. & Morefield, P. (2011). The Vulnerability Cube: A Multi-Dimensional Framework for Assessing Relative Vulnerability. *Environmental Management*, 48(Issue 3), 631-643. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s00267-011-9690-8>
- Lomas, K. y Giridharan, R. (2012). Thermal Comfort Standards, Measured Internal Temperatures and Thermal Resilience to Climate Change of Free-Running Buildings: A Case-Study of Hospital Wards. *Building and Environment*, 55, 57-72. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.006>
- Lomborg, B. (2006). *The Skeptical Environmentalist*. Cambridge, EE.UU.: Cambridge University Press.
- Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D. y Hensen, J. (2013). Climate Adaptive Building Shells: State-of-the-Art and Future Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483-493. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- MacClune, K. y Optiz-Stapleton, S. (2012). *Building Urban Resilience to Climate Change: What Works Where, and Why*. Recuperado de: <http://i-s-e-t.org/resources/working-papers/building-resilience.html>
- Machalaba, C., Romanelli, C., Stoett, P., Baum, S., Bouley, T., Daszak, P. y Karesh, W. (2015). Climate Change and Health: Transcending Silos to Find Solutions. *Annals of Global Health*, 81(Issue 3), 445-458. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.002>
- Major, S. (2012). *Building Resilience: A Complex Systems Approach to Sustainable Design*. Cincinnati, OH, EE.UU.: University of Cincinnati.
- Malalgora, C., Amaratunga, D. y Haigh, R. (2014). Challenges in Creating a Disaster Resilient Built Environment. *Procedia Economics and Finance*, 18, 736-744. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00997-6](http://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00997-6)
- Martínez, A., Afanador, E., Zapata, J., Núñez, J., Ramírez, R., Yepes, T. y Garzón, J. (2013). *Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: Fedesarrollo/Energía de Bogotá.
- Martinez, A., Patterson, M., Carlson, A. y Noble, D. (2015). Fundamentals in Façade Retrofit Practice. *Procedia Engineering*, 118, 934-941. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.534>
- Martins, A., Mata, T., Costa, C. y Sikdar, S. (2007). Framework for Sustainability Metrics. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(10), 2962-2973. Recuperado de: <http://doi.org/10.1021/ie060692l>
- Mensah, P., Merkuriev, Y. y Longo, F. (2015). Using ICT in Developing a Resilient Supply Chain Strategy. *Procedia Computer Science*, 43, 101-108. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.12.014>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2011). *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social* (Vol. 2). Recuperado de: http://www.min-vivienda.gov.co/Documents/guia_asis_tec_vis_2.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). *Criterios ambientales para el diseño y construcción de*

vivienda urbana. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/cartilla_criterios_amb_diseno_construc.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2015). *Anexo No. 1 - Guía de construcciones sostenibles para el ahorro de agua y energía en edificaciones*. Recuperado de: <http://www.andesco.org.co/images/Camaras/medioambiente/1.Anexo1-GuiadeConstruccionSostenibleparaalahorodeaguayenerg%C3%ADaenedificaciones.pdf>

Moles, O., Caimi, A., Islam, M., Hossain, T. & Podder, R. (2014). From Local Building Practices to Vulnerability Reduction: Building Resilience through Existing Resources, Knowledge and Know-How. *Procedia Economics and Finance*, 18, 932-939. Recuperado de: [http://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)01020-X](http://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)01020-X)

Montealegre, J. (2012). *Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá Cundinamarca*. Recuperado de: http://oab2.ambiente-bogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c-26f970cb14a/informe-tecnico_analisis-variabilidad.pdf

Moreno, O. (enero-julio de 2013). Paisajes Resilientes. Reflexiones en torno a la reconstrucción de territorios desde el manejo y diseño de Infraestructuras Verdes, en el marco de las estrategias de gestión de riesgo ante desastres. *Geografía Austral*, 5(1), 1-19.

National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Board on Life Sciences and Committee on Ecological Impacts of Climate Change (2008). *Ecological Impacts of Climate Change*. Washington D.C., EE.UU.: The National Academies Press.

National Research Council (2013). *Energy-Efficiency Standards and Green Building Certification Systems Used*

by the Department of Defense for Military Construction and Major Renovations. Washington D.C., EE.UU.: The National Academies Press.

Navarro, J., Hernández, R., Irulegi, M., Sertutxa, A., Ortega, D. & Tavakoli, N. (2-3 octubre de 2013). Elaboración de un modelo de diagrama de confort que permita la mejora ambiental de espacios urbanos mediante estrategias de ecodiseño. En *Greencities & Sostenibilidad: Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana. Comunicaciones y 2ª bienal de proyectos de edificación y urbanismo sostenible*. Congreso llevado a cabo en Málaga, España.

Ng, S., Wong, J., Skitmore, S. & Veronika, A. (2012). Carbon Dioxide Reduction in the Building Life Cycle: A Critical Review. *Proceedings of the ICE - Engineering Sustainability*, 165 (Issue 4), 281-292. Recuperado de: <http://doi.org/10.1680/ensu.11.00005>

Nurzyński, J. (2015). Is Thermal Resistance Correlated with Sound Insulation? *Energy Procedia*, 78, 152-157. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.131>

Omer, A. (2013). Low Energy Building Materials: An Overview. In M. Valente Neves and A. C. V. Neves (Eds.), *Environment 2010: Situation and Perspectives for the European Union*, 2 (pp. 1257-1263). Port, Lisbon: Universidade do Porto.

Pabón, J. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, (12), 111-119. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/10277/10796>

Palekiene, O., Simanaviciene, Z. & Bruneckiene, J. (2015). The Application of Resilience Concept in the Regional Development Context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 213, 179-184. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.423>

- Pamungkas, A., Bekessy, S. & Lane, R. (2014). Vulnerability Modelling to Improve Assessment Process on Community Vulnerability. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 135, 159-166. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.341>
- Pelling, M. & Manuel-Navarrete, D. (2011). From Resilience to Transformation: The Adaptive Cycle in Two Mexican Urban Centers. *Ecology and Society*, 16(2), 11. Recuperado de: <https://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art11/>
- Phadke, R., Manning, C. y Burlager, S. (2015). Making It Personal: Diversity and Deliberation in Climate Adaptation Planning. *Climate Risk Management*, 9, 62-76. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.crm.2015.06.005>
- Pickett, S., Cadenasso, M. y McGrath, B. (Eds.) (2013). Urban Resilience in Ecology and Design. Linking Theory and Practice for Sustainable Cities. New York, EE.UU.: Springer.
- Pisano, U. (2012). *Resilience and Sustainable Development: Theory of Resilience, Systems Thinking and Adaptive Governance*. ESDN Quarterly Report, N° 26. Vienna, Austria: ESDN.
- Prasad, N., Raghieri, F., Shah F., Trohanis, Z., Kessler, E. y Sinha, R. (2008). *Climate Resilient Cities. A Primer on Reducing Vulnerabilities to Disasters*. Washington D.C., EE.UU.: The World Bank.
- Ramos, H. (2011). El confort en la vivienda de bajo costo: modelo metodológico para diagnosticar higratermicidad, iluminación y acústica. *Traza*, 2(4), 48-67.
- Raven, J. (2011). Cooling the Public Realm: Climate-Resilient Urban Design. In K. Otto-Zimmermann (Ed.), *Resilient Cities. Local Sustainability* (Vol. 1, pp. 451-463). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Roaf, S., Crichton, D. y Nicol, F. (2009). *Adapting Buildings and Cities for Climate Change. A 21st Century Survival Guide*. Recuperado de: http://library.uniteddiversity.coop/Ecological_Building/Adapting_Buildings_and_Cities_for_Climate_Change.pdf
- Rocha-Tamayo, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. *Revista nodo*, 6(11), 99-116.
- Rodríguez, A. (2012). *Síntesis sobre la evaluación y proyección de la variabilidad interanual del clima relacionada con los fenómenos El Niño y la Niña*. Bogotá, Colombia: PRICC.
- Saladen, G., Quiroga, C., Ramírez, J., Wiesner, M. y Puerto, P. (2012). *Documento Técnico Soporte de la Política Pública de Construcción Sostenible para Bogotá D.C.* Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital de Planeación.
- Salat, S. y Bourdic, L. (2011). Power Laws for Energy Efficient and Resilient Cities. *Procedia Engineering*, 21, 1193-1198. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2130>
- Samad, T., Lozano-Gracia, N. y Panman, A. (2012). *Colombia Urbanization Review: Amplifying the Gains from the Urban Transition*. Recuperado de: <http://doi.org/10.1596/978-0-8213-9522-6>
- Saunders, W. y Becker, J. (2015). A Discussion of Resilience and Sustainability: Land Use Planning Recovery from the Canterbury Earthquake Sequence, New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14 (Part 1), 73-81. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.013>
- Schalk, M. (2014). The Architecture of Metabolism. Inventing a Culture of Resilience. *Arts*, 3(2), 279-297. Recuperado de: <http://doi.org/10.3390/arts3020279>

- Scholz, R., Blumer, Y. y Brand, F. (2012). Risk, Vulnerability, Robustness, and Resilience from a Decision-Theoretic Perspective. *Journal of Risk Research*, 15(Issue 3), 313-330. Recuperado de: <http://doi.org/10.1080/13669877.2011.634522>
- Schulze, P. (Ed.) (1996). *Engineering within Ecological Constraints*. Washington D.C., EE.UU.: The National Academies Press.
- Schuschny, A. (30 de enero de 2014). Sostenibilidad y Resiliencia Urbana: Aportes para su medición Andrés Schuschny Antecedentes. En *Conversatorio: Evaluación de la sustentabilidad urbana - Secretaría Distrital de Ambiente - ONU Hábitat*. Conversatorio realizado en Bogotá, Colombia.
- Secretaría Distrital de Planeación, Secretaría Distrital de Ambiente y Secretaría Distrital de Hábitat (2013). *Política pública de ecourbanismo y construcción sostenible para Bogotá D.C.* Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Secretaria de Planeación (2012). *Bogotá. Ciudad de estadísticas*. Recuperado de: <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/Bogot%E1%20Ciudad%20de%20Estad%EDsticas/2012/DICE123-BoletinConsProdAguasUsoRes-2012.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá D.C. (2012). *Plan distrital de adaptación y mitigación a la variabilidad y el cambio climático /2012-2038*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá D.C. (2014). *Plan distrital de adaptación y mitigación a la variabilidad y el cambio climático*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá D.C. (2015). *Plan distrital de adaptación y mitigación a la variabilidad y el cambio climático*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) (2008). *Edificación sustentable en América del Norte. Oportunidades y retos*. Recuperado de: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges-es.pdf>
- Setyowati, E. (2014). Eco-building Material of Styrofoam Waste and Sugar Industry Fly-Ash Based on Nano-Technology. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 245-253. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.031>
- Sever, M., Garb, Y. & Pearlmutter, D. (24-28 september 2012). Exploring Barriers to the Integrated Design and Production of Resilient Buildings in Israel. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Conference held in Lisbon, Portugal.
- Sharifi, A., y Yamagata, Y. (2014). ScienceDirect Resilient Urban Planning: Major Principles and Criteria. *Energy Procedia*, 61, 1491-1495. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.154>
- Sharma, B., Singh, R. & Singh, R. (2013). *Urban Climate Resilience: A Review of the Methodologies Adopted under the ACCCRN Initiative in Indian Cities*. Recuperado de: <http://pubs.iied.org/pdfs/10650IIED.pdf>
- Short, C., Lomas, K., Giridharan, R. & Fair, A. (2012). Building Resilience to Overheating into 1960's UK Hospital Buildings within the Constraint of the National Carbon Reduction Target: Adaptive Strategies.

- Building and Environment*, 55, 73-95. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.031>
- SIEMENS (2009). Quo Vadis Energy Sustainability? *Clean Technologies and Environmental Policy*, 11, 367-369. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s10098-009-0262-z>
- SIEMENS (2015). Creating Resilient Cities. Munich: *SIEMENS: Topic Areas*. Recuperado de: <https://www.siemens.com/global/en/home/company/topic-areas/intelligent-infrastructure/resilient-cities.html>
- Simonsen, S., Biggs, R., Schlüter, M., Schoon, M., Bohensky, E., Cundill, G., ... Moberg, F. (2014). *Applying resilience thinking: Seven principles for building resilience in social-ecological systems*. Recuperado de: <http://www.stockholmresilience.org/download/18.10119fc11455d3c557d6928/1398150799790/SR-C+Applying+Resilience+final.pdf>
- Sircar, I., Sage, D., Goodier, C., Fussey, P. y Dainty, A. (2013). Constructing Resilient Futures: Integrating UK multi-stakeholder transport and energy resilience for 2050. *Futures*, 49, 49-63. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.futures.2013.04.003>
- Sitterle, V., Freeman, D., Goerger, S. y Ender, T. (2015). Systems Engineering Resiliency: Guiding Tradespace Exploration within an Engineered Resilient Systems Context. *Procedia Computer Science*, 44, 649-658. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.013>
- Soeleman, M. (2012). *Responsive Climate Design: A Biomimetic Approach*. Recuperado de: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:51de5782-dcc4-44f8-90f0-d10bd14e4edc/datastream/OBJ/download>
- Stern, N. (2008). The Economics of Climate Change. *American Economic Review*, 98(2), 1-37. Recuperado de: <http://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>
- Stevenson, F. y Baborska-Narozny, M. (april 10-13 2014). Designing resilient housing for co-evolutionary adaptivity. In *8th Windsor Conference: Counting the cost of comfort in changing world*. Conference held in Windsor, UK.
- Sullivan, L. (2012). *The RIBA Guide to Sustainability in Practice*. Recuperado de: <http://www.architecture.com/Files/RIBAProfessionalServices/RIBAGuidetoSustainabilityinPractice.pdf>
- Sunikka-Blank, M. (2006). *Policies for improving energy efficiency in the European housing stock*. Amsterdam, The Netherlands: IOS Press
- The World Bank (2010). *Cities and Climate Change: An Urgent Agenda*. Recuperado de: <http://siteresources.worldbank.org/INTUWM/Resources/340232-1205330656272/CitiesandClimateChange.pdf>
- Tran, T. y Tran, P. (2013). *Potentials To Build Disaster Resilience For Housing: Lessons Learnt From The Resilient Housing Design Competition 2013*. Recuperado de: file:///C:/Users/usuario/Downloads/ISSET2013_Sheltering%20Series_5_PotentialsToBuildDisasterResilience_140307.pdf
- UNEP y UNEP Sustainable Buildings & Climate Initiative (2009). *Buildings and climate change. A summary for Decision Makers*. Recuperado de: http://www.greeningtheblue.org/sites/default/files/Buildings%20and%20climate%20change_0.pdf
- UN-HABITAT. (2014). *City Resilience Profiling Programme. Global Platform for Disaster Risk Reduction 2013*.

- Recuperado de: http://www.preventionweb.net/files/globalplatform/entry_bg_paper~crppbrochure2.pdf
- United Nations Economic Commission for Europe (2011). *Climate Neutral Cities*. Recuperado de: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/Publications/climate.neutral.cities_e.pdf.
- United States Green Building Council and Land Use Law Center (Pace Law School) (2013). *Technical Guidance Manual for Sustainable Neighborhoods*. Recuperado de: http://www.usgbc.org/sites/default/files/Technical%20Guid.%20Man.%20for%20Sust.%20Neighborhoods_2012_Part%20A_1f_web.pdf
- United States Green Building Council (2014). *LEED v4 para el diseño y la construcción de edificios (LEED v4 for Building Design And Construction)*. Recuperado de: http://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC_10%2001%2014_ES_3.25.17.pdf
- Universidad de los Andes & Alcaldía Mayor de Bogotá (22-24 septiembre de 2010). Actualización del código de construcciones de Bogotá. In *RC 2010-Reunión del concreto*. Evento llevado a cabo en Cartagena de Indias, Colombia.
- Vardoulakis, S., Dimitroulopoulou, C., Thornes, J., Lai, K.-M., Taylor, J., Myers, I.,... Wilkinson, P. (2015). Impact of Climate Change on the Domestic Indoor Environment and Associated Health Risks in the UK. *Environment International*, 85, 299-313. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.010>
- Vásquez, C. (2006). El diseño del sistema de cerramiento. *ARQ*, (89), 102-107.
- Vergara, W., Alatorre, C. y Alves, L. (2013). *Repensemos nuestro futuro energético. Un documento de discusión sobre energía renovable para el Foro Regional 3GFLAC*. Recuperado de: http://www.miningclub.com/upload/archivos/Repensemos_nuestro_futuro_energético_600.pdf
- Vial, C. (2014). *Un Vitruvio ecológico-Principios y prácticas del proyecto arquitectónico sostenible*. Barcelona, España: CSCAE, GG, ARQ Libros.
- Vieites, E., Vassileva, I. & Arias, J. (2015). European Initiatives Towards Improving the Energy Efficiency in Existing and Historic Buildings. *Energy Procedia*, 75, 1679-1685. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.418>
- Virani, S. & Stolzar, L. (2014). A Hybrid System Engineering Approach for Engineered Resilient Systems: Combining Traditional and Agile Techniques to Support Future System Growth. *Procedia Computer Science*, 28(2014), 363-369. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.03.045>
- Wang, Q., Zhan, Y., Ahuja, S. & Augenbroe, G. (16-18 december 2014). Re-evaluation of Passive Design Measures in the BASF House in Recognition of Uncertainty and Model Discrepancy. In *30th International Plea Conference*. Conference held in CEPT University, Ahmedabad, India.
- Wang, Y., Berardi, U. & Akbari, H. (2015). The Urban Heat Island Effect in the City of Toronto. *Procedia Engineering*, 118, 137-144. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.412>
- Weichselgartner, J. & Kelman, I. (2015). Geographies of Resilience: Challenges and Opportunities of a Descriptive Concept. *Progress in Human Geography*, 39(3), 249-267. Recuperado de: <http://doi.org/10.1177/0309132513518834>

- Widera, B. (16-18 december 2014). Possible Application of Seaweed as Building Material in the Modern Seaweed House on Læsø. In *30th International Plea Conference*. Conference held in CEPT University, Ahmedabad, India.
- Wilde, P. de y Coley, D. (september 2012). The Implications of a Changing Climate for Buildings. *Building and Environment*, 56, 1-7.
- Wilkinson, S., Costelo, S. y Sajoidi, M. (abr-may 2014). Resilient Buildings. *Build*, 141, 43-67.
- Woods, J. (2008). Expanding the Principles of Performance to Sustainable Buildings. *Real Estate Issues*, 33(3), 37-46. Recuperado de: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=36365474&site=ehost-live>
- World Bank y GFDRR (2012). *The Sendai Report: Managing Disaster Disaster Risks for a Resilient Future*. Recuperado de: http://www.gfdrr.org/sites/gfdrr/files/publication/Sendai_Report_051012_0.pdf
- World Health Organization (2011). *Health in the Green Economy. Health Co-Benefits of Climate Change Mitigation. Transport Sector*. Recuperado de: http://www.who.int/hia/examples/trspt_comms/hge_transport_lowresdurban_30_11_2011.pdf
- Xue, Y., Sun, H. y Duan, Y. (2015). Research on Decision Framework for Multi-Hazard Resilient and Sustainable Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 738-739, 281-284. Recuperado de: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.738-739.281>
- Yang, P. P. (2015). Energy Resilient Urban Form: A Design Perspective. *Energy Procedia*, 75, 2922-2927. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.592>
- Yannas, S. (9-12 november 2003). Towards Environmentally-Responsive Architecture. En *20th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Conference held in Santiago de Chile, Chile.
- Zari, M. (2010). Biomimetic Design for Climate Change Adaptation and Mitigation. *Architectural Science Review*, 53(Issue 2), 172-183. Recuperado de: <http://doi.org/10.3763/asre.2008.0065>
- Zari, M. (2012). Ecosystem Services Analysis for the Design of Regenerative Built Environments. *Building Research & Information*, 40(Issue 1), 54-64. Recuperado de: <http://doi.org/10.1080/09613218.2011.628547>



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

Editado por la Universidad Católica de Colombia
en octubre de 2017, impreso en papel Propalibros de 75 g,
en tipografía Adobe Caslon Pro, tamaño 11 pts.

Publicación digital:
Hipertexto Ltda.

Impreso por:
Xpress Estudio Gráfico y Digital S.A.

Sapientia aedificavit sibi domum

Bogotá, D. C., Colombia



El uso extensivo de grandes superficies urbanizadas en Bogotá ha causado el incremento de islas de calor en la ciudad, fenómeno que va en detrimento de la calidad del hábitat urbano. En dicha medida, el propósito de esta investigación fue describir los conceptos de resiliencia, cambio climático y vulnerabilidad aplicados en Bogotá, puesto que una alternativa a esta problemática es desarrollar el concepto de territorio resiliente dentro de los procesos de construcción de la ciudad. Un territorio resiliente se define como la superficie que contiene múltiples espacios que relacionan diferentes actores para caracterizar un área urbana. El resultado de esta investigación fue un piloto de simulación estocástica simple, el cual generó una metodología de evaluación con el propósito de identificar el comportamiento de un Territorio Resiliente y Eficiente (TRE), capaz de acomodarse a las nuevas situaciones ambientales.

ISBN: 978-958-8934-94-5



9 789588 934945